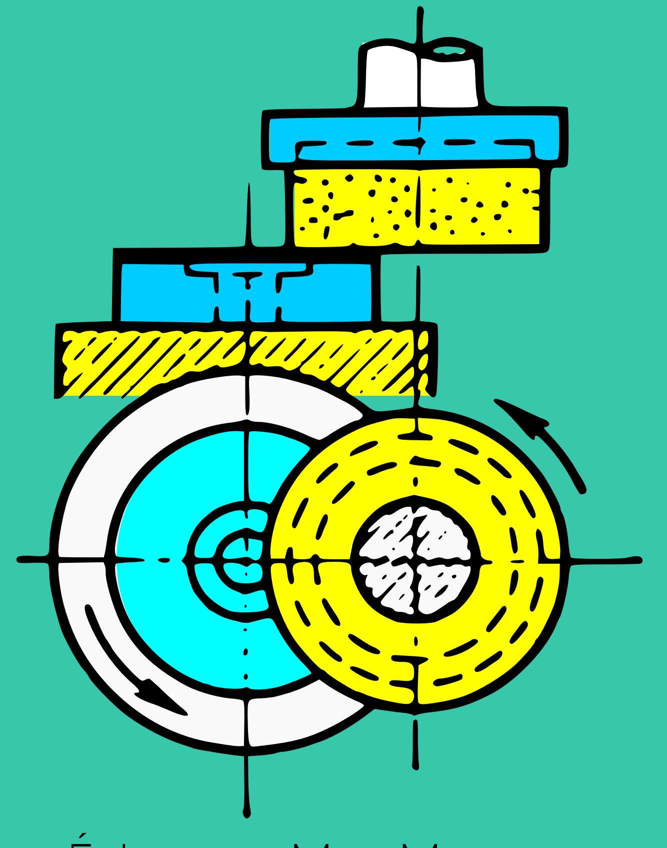
V. Kovan

TECHNOLOGIE DE LA CONSTRUCTION MÉCANIQUE



Éditions Mir Moscou

В. М. КОВАН

ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЕ • МОСКВА

V. KOVAN

Technologie de la construction mécanique

ÉDITIONS MIR • MOSCOU

1970

CDU=621.01 (075.8)=40

Traduit du russe
par Valentin Polonski

На французском языке

Introduction

La construction mécanique est un des maillons essentiels de l'économie nationale du fait que sa production intéresse tous les domaines de l'activité économique.

Les progrès enregistrés par les industries mécaniques, la montée du niveau technologique déterminent pour beaucoup l'essor de la technique, de toutes les branches de l'économie nationale.

On peut dire que le progrès technique est défini en somme par le lien indissoluble existant entre l'étude des machines perfectionnées et le perfectionnement des gammes de leur production.

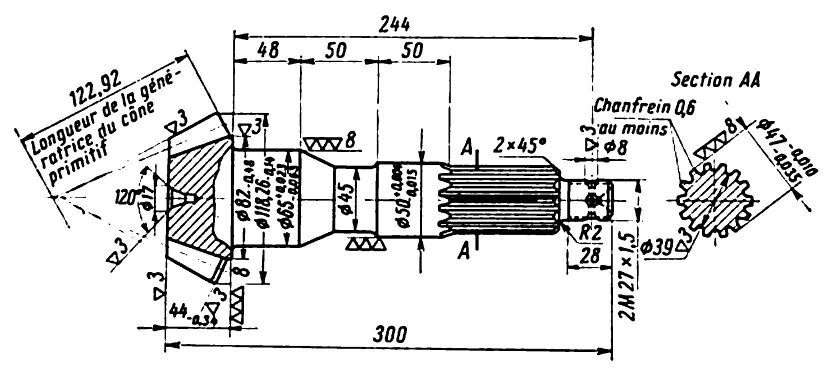


Fig. 1. Pignon conique à queue
Matériau : acier ; dureté H_{RC} = 56 à 62

Les modes de fabrication sont fonction de la destination des machines, des conditions de leur exploitation, de leurs caractéristiques fonctionnelles et des prescriptions techniques ; ils varient également pour le même type de machine et pour ses éléments en fonction du volume de production, c'est-à-dire du facteur quantitatif.

Ainsi, l'ébauche d'un pignon conique à queue représenté sur la fig. 1 peut être obtenue soit par forgeage libre, soit par estampage à chaud.

L'usinage des bouts d'un arbre prévus pour le centrage peut se faire soit par dressage sur un tour, soit par fraisage sur une fraiseuse

horizontale ou une fraiseuse à tambour. Le centrage de l'arbre peut être exécuté sur une machine à centrer avec une ou deux poupées; enfin, le fraisage des bouts et le centrage peuvent être réalisés en une sous-phase sur une fraiseuse à centrer.

Le façonnage des portées de l'arbre peut imposer l'utilisation d'un tour ordinaire (tourillonnage), des tours semi-automatiques à outils multiples (dressage consécutif des bouts de l'ébauche), un tour semi-automatique à outils multiples (usinage de la partie de l'ébauche prévue pour le pignon), un tour à profiler hydraulique semi-automatique (façonnage de la queue) ; mais l'ébauche de ce même arbre peut être également façonnée sur un tour vertical multibroche.

Les portées de l'arbre (⌀50 et 65 mm) peuvent être rectifiées sur une machine cylindrique par avance longitudinale ou transversale; l'opération peut être exécutée également «en plongée» par un train de deux meules d'une machine à rectifier « Centerless » agissant simultanément sur les portées.

Les variantes citées des gammes d'usinage ne sont pas exhaustives, dans plusieurs cas il existe d'autres solutions rationnelles.

Notre exemple montre que même dans le cas d'une pièce relativement simple, un agent de méthodes chargé de l'analyse des travaux doit faire face à toute une série de problèmes. Parmi ces problèmes il y a notamment le choix du mode de fabrication de l'ébauche, celui de la variante d'usinage, des machines et de l'appareillage à utiliser, l'établissement des cotes de la pièce capable et des régimes d'usinage à tous les échelons de la gamme, depuis l'ébauche jusqu'à la pièce finie.

Le mode de montage des machines peut varier lui aussi; il peut se faire par ajustage individuel des pièces, par sélection des pièces, par le recours au principe d'interchangeabilité (sans sélection et ajustage) et par d'autres méthodes.

Ainsi, l'analyse des travaux de montage doit également résoudre toute une série de problèmes relatifs à l'établissement de la gamme et peut être réalisée en plusieurs variantes dont chacune réclame des machines et des appareillages définis, de même qu'une quantité définie de travail.

L'ambition de la technologie de la construction mécanique est justement d'indiquer la façon de faire face à toutes ces tâches compte tenu de la construction de la machine à produire, des prescriptions techniques que cette machine doit satisfaire et du programme de production.

Lors de l'étude des machines et de leurs éléments, il faut prendre en considération les moyens de la production. Voici des exemples à titre d'illustration.

La fig. 2 représente deux variantes d'un couvercle de carter d'un moteur: la variante *a* rend le moulage plus compliqué imposant

l'emploi d'un noyau pour l'exécution du moule, alors que la variante *b*, réalisable sans noyau, simplifie nettement l'opération.

La fig. 3 représente l'ancienne (*a* et *b*) et la nouvelle (*c*) conception du corps d'un démultiplicateur; auparavant le plan du plat *A* était au-dessous des nervures de refroidissement *B*, alors qu'en modifiant la construction on le place au-dessus de ces nervures.

La fig. 4 montre que dans le cas de la première variante le plat doit être dressé par une fraise en bout suivant le contour (fig. 4,*a*). La variante modifiée permet d'effectuer l'opération avec une fraise à surfacer d'un diamètre supérieur à la largeur du plat (fig. 4,*b*), c'est-à-dire en une seule passe, réduisant ainsi de moitié le temps d'usinage.

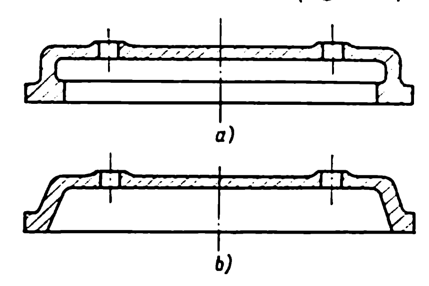


Fig. 2. Couvercle du carter d'un moteur

La fig. 5 représente deux variantes de construction de la commande d'une broche de fraiseuse verticale. La gamme de montage de la variante *b* est beaucoup plus simple que celle nécessaire pour le montage de la variante *a*. Par ailleurs, la deuxième variante permet d'effectuer le montage et les essais de la commande indépendamment des autres ensembles de la machine.

La fig. 6 donne deux solutions de réalisation d'un boulonnage, dont la première (*a*) ne permet de serrer l'écrou qu'avec une clé usuelle, alors que la deuxième (*b*) autorise l'utilisation d'une boulonneuse électrique et permet ainsi de mécaniser le montage et d'accroître le rendement.

La conclusion qui s'impose après les exemples cités est que la gamme d'usinage des éléments mécaniques se trouve dans une grande mesure définie par leur construction.

L'étude de l'analyse des travaux en construction mécanique permet d'acquérir des connaissances nécessaires pour apprécier l'objet de fabrication sous l'optique des travaux que demande son exécution ; ces connaissances aident l'agent du Bureau d'études à établir des dessins d'objets de façon à éliminer au possible les difficultés de fabrication.

Les exemples que nous venons de passer en revue caractérisent dans une certaine mesure le domaine très vaste des problèmes posés par l'étude des machines et l'établissement des gammes de leur fabrication.

De nos jours, la technologie a atteint un si haut niveau qu'il est presque impossible, sans sortir du cadre d'une seule spécialité, de faire preuve de connaissances également profondes dans tous les

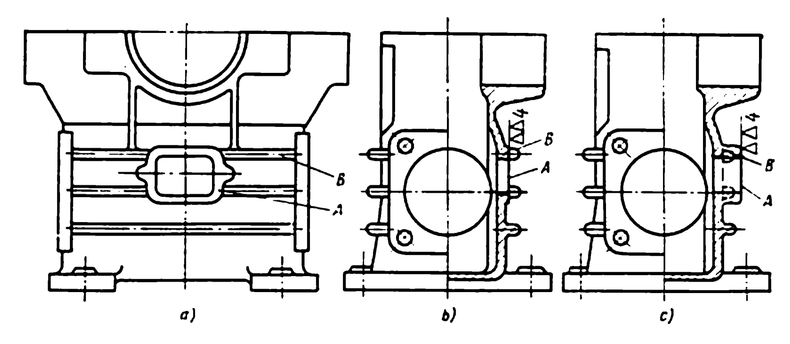


Fig. 3. Deux variantes de construction d'un corps de démultiplicateur

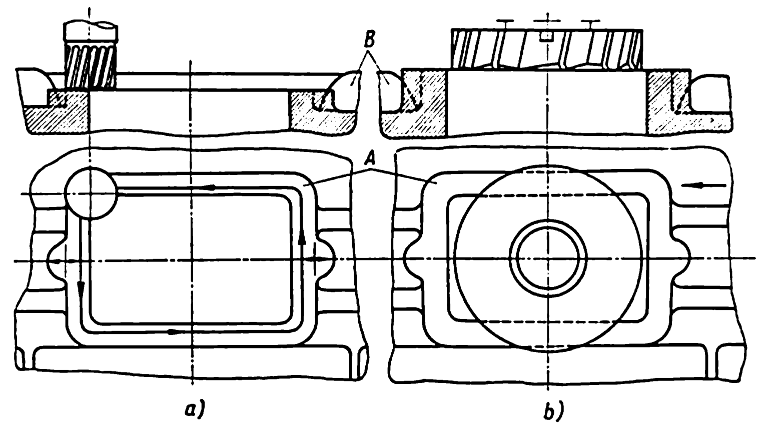


Fig. 4. Deux procédés d'usinage d'un corps de démultiplicateur définis par sa construction

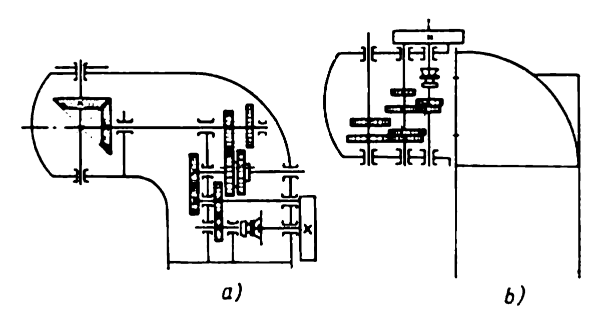


Fig. 5. Deux variantes de construction de la commande d'une broche de fraiseuse verticale

domaines de la construction mécanique; il en résulte que les disciplines qui traitent des modes de fabrication tels que le moulage, le forgeage, l'estampage, le traitement thermique, le soudage, etc., jouent un rôle indépendant.

La technologie de la construction mécanique est l'exposé de l'ensemble des connaissances sur les opérations terminales de la fabrication des machines, et notamment sur l'usinage des ébauches et l'assemblage des pièces finies. La justification du titre de ce manuel réside dans le fait que l'assemblage est justement l'opération terminale de la fabrication des machines; en outre, actuellement le montage des ensembles est si étroitement lié aux opérations d'usinage des pièces mécaniques qu'il est illogique de les examiner à part. Ainsi, une fois les plans de séparation du corps d'un démultiplicateur et de son couvercle usinés, on procède au façonnage du corps assemblé; la bielle et son chapeau sont usinés d'abord séparément puis assemblés; limitons-nous à ces exemples tout en notant que le montage intermédiaire des ensembles qui subissent ensuite l'usinage est très usité en construction mécanique.

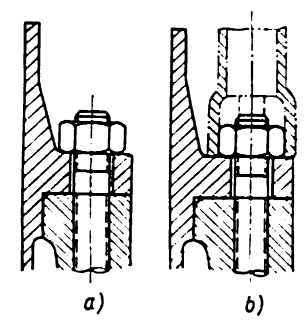


Fig. 6. Deux conceptions d'un boulonnage

Les tendances actuelles à créer des chaînes de fabrication continues, qui se traduisent par l'automatisation totale des sections, des ateliers et des usines, déterminent l'intégration dans les lignes d'usinage de modes opératoires les plus variés (fonderie, traitement thermique, revêtement, équilibrage, etc.). D'où la complexité de l'objet dont traite la technologie de la construction mécanique et les liens intimes qui rattachent ses divers domaines.

Avant de procéder à l'analyse des travaux d'usinage des ébauches prévues pour la fabrication des pièces mécaniques, il faut prendre en considération les propriétés de la matière d'œuvre, la configuration et les dimensions de l'ébauche, la qualité de sa surface, ainsi que l'influence du traitement thermique, s'il est prévu, sur l'usinage ultérieur.

Les problèmes de la fabrication des machines ne peuvent pas non plus être résolus sans l'examen de l'organisation du travail et de l'aspect économique de la production; la technologie de la construction mécanique doit traiter toutes ces matières dans la mesure nécessaire à la mise en lumière de tous les éléments de l'établissement des gammes opératoires.

Un cours de technologie doit examiner également avec force détails les problèmes des rapports de la construction avec les modes

opératoires, car l'organisation d'une machine et les spécifications constructives de ses pièces influent notablement sur la structure de la gamme de fabrication.

La technologie de la construction mécanique fait largement appel aux sciences théoriques et appliquées dont la synthèse contribue à la résolution des problèmes technologiques. Ce travail de synthèse est accompagné par la systématisation et la généralisation de l'expérience industrielle, ainsi que par des recherches technologiques spéciales. Toutes ces activités permettent de formuler et de développer les thèses théoriques essentielles de la technologie qui constituent la base scientifique de l'établissement des gammes d'usinage et justifient le choix judicieux des modes opératoires.

L'interaction des modes opératoires d'élaboration des ébauches et de leur usinage rend possible l'application des gammes de fabrication variées; aussi, l'établissement de ces dernières doit résulter de l'analyse de l'ensemble des travaux relatifs à la fabrication des machines et de leurs éléments. Ainsi, lorsqu'une pièce de configuration complexe peut être remplacée par une pièce soudée ou une construction assemblée par une pièce monobloc, la gamme d'exécution de l'ébauche et le mode d'usinage de l'élément considéré changent radicalement.

Ce n'est que fort d'une connaissance approfondie des modes de façonnage des matériaux d'œuvre que l'on peut établir des gammes d'usinage complexes et rationnelles. Aussi, la technologie des métaux joue-t-elle un rôle particulier en technologie de la construction mécanique, car c'est une science appliquée qui traite des modes opératoires du travail des métaux.

Le rôle de la technologie des matériaux dans le cadre de la technologie de la construction mécanique est encore accru par l'essor de la fabrication des matières plastiques et leur utilisation toujours plus large dans l'élaboration des pièces mécaniques.

A la différence de la technologie des métaux, l'objet de la technologie de la construction mécanique n'est pas l'examen des principes qui sont à la base de la transformation des matériaux, mais la confrontation de divers modes opératoires d'élaboration des pièces mécaniques dans le but de guider le choix et l'application judicieuse de telle ou telle gamme d'usinage suivant les conditions concrètes de la production. La technologie de la construction mécanique traite aussi des méthodes d'établissement des gammes d'usinage et de leur calcul, domaine étranger à la technologie des métaux.

Pour donner à la technologie de la construction mécanique une justification scientifique notons que son but est d'*étudier la théorie de la fabrication des machines de qualité requise, dont le volume de production est prévu par le programme, réclamant le minimum de frais de main-d'œuvre directe et indirecte, c'est-à-dire réduisant les prix de revient au minimum.*

Parmi les tâches essentielles que se pose la technologie de la construction mécanique il y a l'étude des principes physiques, chimiques et autres régissant les modes opératoires et l'établissement des paramètres dont les modifications sont les plus significatives pour intensifier la production et élever sa précision. Dans ce domaine, la description approchée des phénomènes doit faire place à l'analyse mathématique rigoureuse et aux méthodes conformes à la science moderne.

Le rôle de la technologie de la construction mécanique est capital pour la préparation des spécialistes devant travailler directement dans l'industrie ; ils feront appel aux connaissances qu'elle dispense non seulement dans leur activité journalière, mais encore lorsqu'ils auront à affronter l'établissement des gammes d'usinage nouvelles et la conception des projets de construction prévoyant l'application des modes opératoires à productivité élevée.

CHAPITRE PREMIER

Généralités sur le produit et la gamme d'usinage en construction mécanique

§ 1. Produit et ses éléments

Produit fini en tant que résultat du stade terminal de la fabrication. Eléments d'un produit. Pièces mécaniques et ensembles. Classement des ensembles en groupes et sous-groupes. Schématisation du groupement des éléments d'un produit. Notions de gamme et de phase d'assemblage. Les gammes et les phases d'assemblage, leur contenu, leur objectif.

Avant d'aborder l'étude de la technologie de la construction mécanique, il faut d'abord donner la définition d'un produit.

Appelons par convention *produit* le résultat de l'activité d'une entreprise de construction mécanique.

Le produit peut être non seulement une machine définitivement assemblée, mais aussi un ensemble et même une pièce, suivant l'objet de la fabrication de l'entreprise en question. Ainsi, pour une usine d'automobiles, le produit est une voiture, pour une usine de carburateurs, c'est un carburateur, et pour une usine automatique de pistons, c'est un piston.

On appelle *pièce mécanique* un élément primaire du produit défini par l'absence des assemblages, démontables ou non.

On dit *ensemble* pour un élément du produit constitué de deux ou de plusieurs pièces indépendamment du mode de leur conjugaison (démontable ou non) ; sa caractéristique technologique est déterminée par l'aptitude à être monté isolément des autres éléments du produit.

Si un mécanisme défini par sa destination fonctionelle ne peut pas être monté isolément par rapport aux autres éléments du produit, il ne constitue pas d'ensemble du point de vue du processus de la production ; ainsi, la distribution d'un moteur n'est pas un ensemble s'il est impossible de la monter à part.

L'exécution d'un revêtement métallique ou non ne transforme pas la pièce en ensemble, car l'opération consiste à porter sur la pièce un matériau et non à assembler des pièces façonnées séparément.

L'établissement de la gamme d'assemblage est plus aisé lorsque les ensembles sont classés en groupes et sous-groupes.

Un *groupe* est un ensemble qui fait directement partie du produit.

Un *sous-groupe* est un ensemble qui fait partie du produit en tant que composant d'un groupe.

Le sous-groupe de premier ordre est celui qui fait directement partie du groupe. Dans d'autres cas, l'ensemble appartient au groupe en tant que composant d'un sous-groupe ; le rapport avec un groupe détermine la différence d'ordre des sous-groupes. Un ensemble faisant directement partie d'un sous-groupe de premier ordre est dit sous-groupe de deuxième ordre, etc.

Suivant sa conception, un ensemble peut être constitué soit de pièces isolées, soit d'ensembles d'ordres inférieurs et de pièces.

Un groupement rationnel des éléments d'un ensemble simplifie considérablement l'établissement d'une gamme d'assemblage.

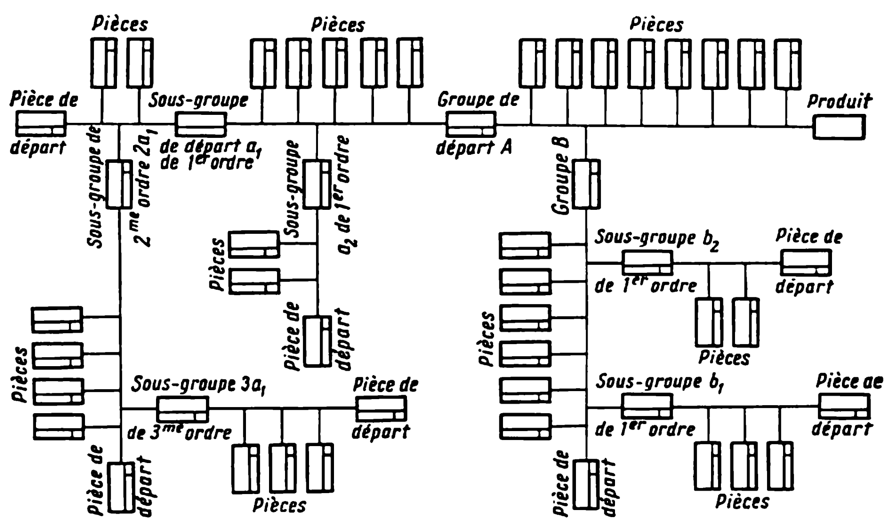


Fig. 7. Représentation schématique de la gamme d'assemblage d'un produit suivant ses pièces élémentaires

La fig. 7 donne la schématisation d'un groupement simple et commode ; elle fait ressortir tous les ensembles et les pièces du produit, de même que l'ordre dans lequel ils sont associés lors du montage.

Lors du groupement des éléments d'un produit, chaque élément de la machine est désigné par un rectangle divisé en trois parties ; en haut on indique la dénomination de l'élément, en bas à gauche, le repère, et à droite, le nombre d'éléments faisant partie de l'ensemble considéré.

Les éléments de machines sont repérés suivant les numéros et les lettres affectés aux pièces et ensembles sur les dessins et dans les spécifications. Pour repérer les ensembles, on marque (frappe) devant le repère les lettres « Сб » (*sborka*, montage).

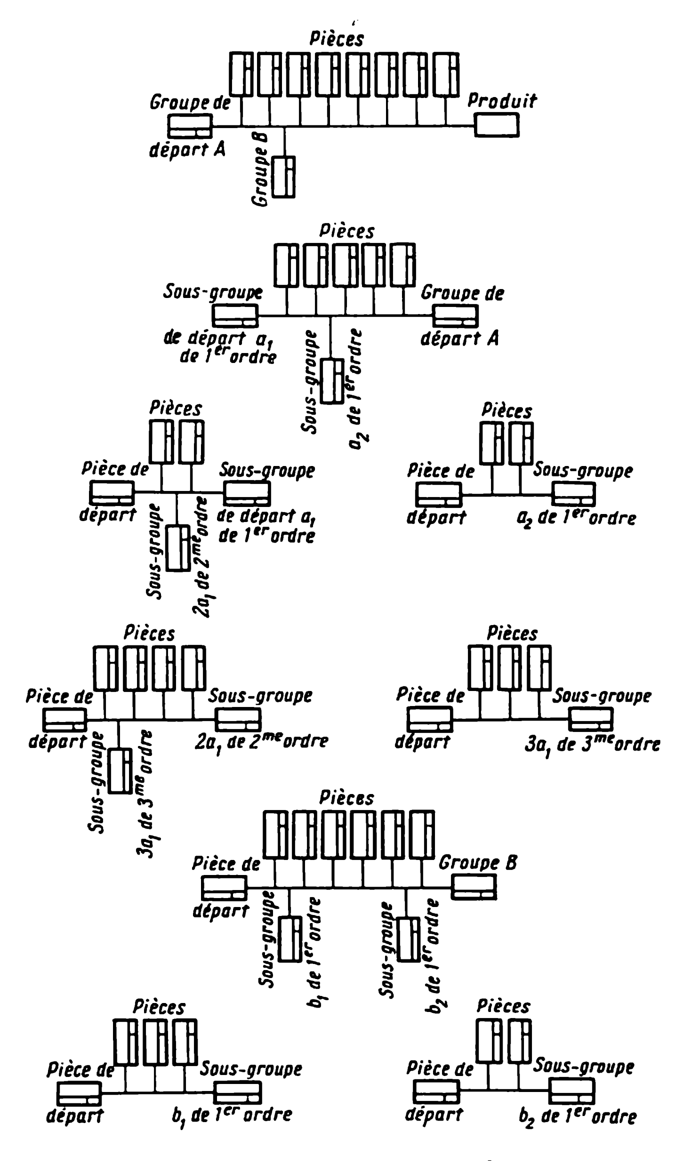


Fig. 8. **Représentation** schématique de la gamme d'assemblage d'un produit et de montage de ses ensembles

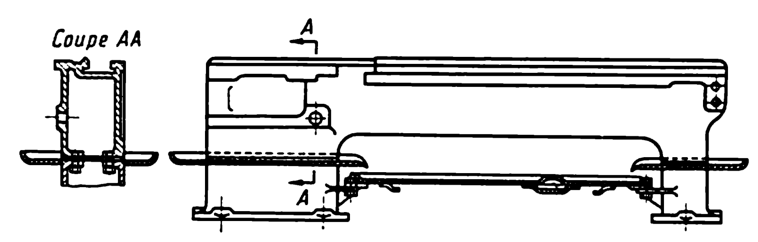


Fig. 9. Banc d'un tour

L'élément principal (pièce ou ensemble) par lequel on commence l'assemblage porte le nom d'*élément de départ*.

La gamme d'assemblage d'une machine et de chacun de ses ensembles est matérialisée par une droite jointe aux rectangles, désignant les éléments, qui se situent aux points correspondants.

Chaque ligne commence par un élément de départ et se termine par une machine ou un ensemble montés. A gauche de la ligne, à partir de l'élément de départ dans le sens de l'ensemble ou du produit monté, on porte dans l'ordre du montage toutes les pièces qui font directement partie de l'ensemble ou de la machine, à l'exception de la pièce de référence; à droite, on porte tous les ensembles (à l'exception de l'ensemble de départ) qui font directement partie de la machine ou de l'ensemble d'ordre supérieur.

En construction mécanique moderne on distingue l'assemblage complet et le montage des ensembles.

L'assemblage complet intéresse toute la machine; parfois cette notion est extrapolée conventionnellement au montage des groupes complexes; le terme de montage des ensembles est appliqué aux sous-groupes et aux groupes relativement simples.

La méthode du groupement des éléments d'un produit rend possible l'établissement des gammes d'assemblage. A cet effet il est avantageux d'établir séparément des gammes d'assemblage complet de la machine et des phases de montage de chacun de ses ensembles; les phases de montage des ensembles ne se rapportent qu'aux pièces et ensembles faisant directement partie de l'ensemble considéré. L'établissement de tels schémas dans l'ordre descendant aboutit aux ensembles qui ne sont constitués que de pièces. La fig. 8 représente la gamme d'assemblage complet et les phases de montage des ensembles d'un produit fini dont le groupement des éléments est représenté sur la fig. 7.

Les feuilles des gammes d'assemblage portent des spécifications supplémentaires qui définissent le contenu des opérations de montage lorsqu'il n'est pas déterminé par le dessin lui-même. La fig. 9 représente à titre d'exemple le dessin de montage d'un banc de tour, alors que la fig. 10 indique la gamme d'assemblage de ce banc.

Les gammes et les phases d'assemblage indiquent l'ordre d'association des articles et des ensembles; elles simplifient nettement l'établissement des opérations de montage, rendent logique l'ordre de leur exécution et en plus, permettent d'apprécier la construction d'un produit du point de vue technologique.

Un produit complexe présente un net avantage technologique lorsque son montage peut être effectué à partir d'ensembles montés au préalable; dans ce cas l'assemblage complet est favorisé par deux considérations importantes. En premier lieu, l'ensemble est posé sur le produit monté après la vérification du montage par le service de contrôle, et, si la nécessité se présente, après des essais de l'ensemble monté; ainsi on améliore nettement la qualité du montage, car les causes des défaillances relevées sont recherchées dans ce cas dans la conjugaison des ensembles et non pas au sein des ensembles eux-mêmes. De plus, la construction d'un produit dont le montage peut être réalisé à partir d'ensembles déjà assemblés permet de poursuivre les travaux de montage sur un large front afin d'assembler simultanément les ensembles et le produit fini tout en diminuant nettement la durée du montage. Les gammes d'assemblage illustrent d'une manière concrète la façon dont ces conditions sont observées; par ailleurs, l'établissement des gammes d'assemblage conformes au dessin de montage révèle les erreurs de conception qui rendent le montage plus compliqué.

Un ensemble monté préalablement mais qui nécessite un démontage complet ou partiel pour sa mise en place définitive est dit *assem-*

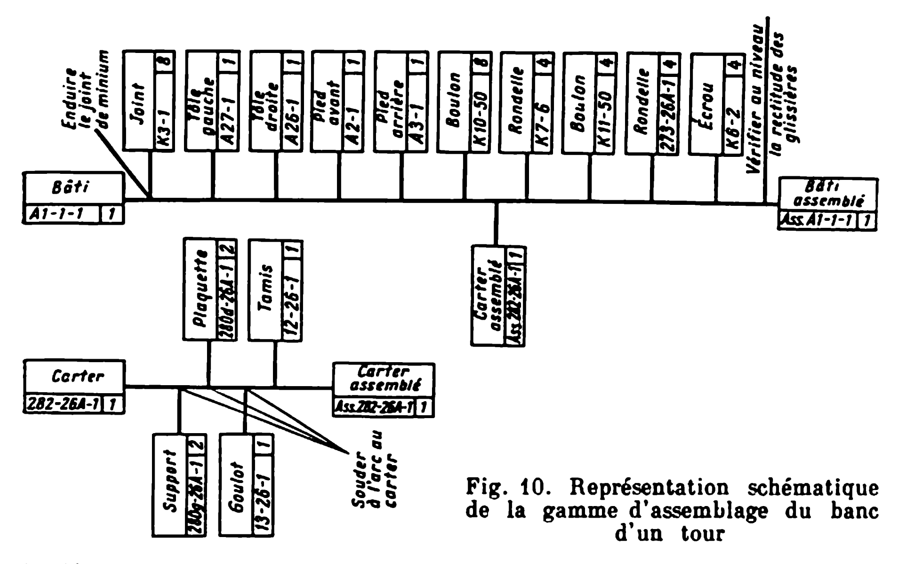


Fig. 10. Représentation schématique de la gamme d'assemblage du banc d'un tour

blage, pour le distinguer des ensembles (groupes et sous-groupes) posés assemblés ; par exemple, le piston et la bielle assemblés constituent un assemblage, car cet ensemble, monté préalablement et vérifié à l'aide d'un dispositif de contrôle, est démonté pour permettre la fixation de la bielle au maneton du vilebrequin.

La gamme de montage d'un assemblage est établie de la même façon que celle d'un ensemble quelconque (groupe ou sous-groupe) ; la feuille de la gamme de montage de l'ensemble dont fait partie l'assemblage considéré porte alors une inscription explicative correspondante. Dans le cas d'un piston et d'une bielle assemblés, il faut écrire : « desserrer les écrous des boulons, déposer le chapeau de la tête de bielle, asservir la bielle au maneton du vilebrequin, vérifier les coussinets, poser sur les boulons le chapeau de bielle, visser et serrer les écrous des boulons de serrage ».

Il existe également en mécanique la notion de *groupe* ; c'est une association de plusieurs machines, installations ou appareils divers dans le but de rendre leur travail plus efficace ; une turbogénératrice qui réunit une turbine à vapeur et une génératrice électrique en est un exemple.

Le terme de groupe s'emploie également pour désigner les organes auxiliaires d'une machine, tel le carburateur qui peut être envisagé comme un groupe de moteur à combustion interne, ainsi que pour désigner les unités d'usinage normalisées ; à titre d'exemple il n'est que d'indiquer les machines spéciales que sont des machines-outils conçues à partir d'un jeu d'éléments normalisés.

§ 2. Gamme de production et gamme de fabrication en construction mécanique

Notion de gamme de production. Gamme de fabrication et ses éléments : phase, sous-phase, indexage, reprise ; notion de passe ; division de la reprise en éléments de travail.

Notions de production de masse, de fabrications sérielle et unitaire, de travail à la chaîne et de cadences des lignes de fabrication.

En construction mécanique, la gamme de production consiste en un ensemble de procédés qui transforment la matière d'œuvre (matériaux et semi-fabriqués) en produits finis d'une destination déterminée.

La gamme de production implique la préparation des moyens de production et l'organisation de la desserte des postes de travail ; la réception et le stockage des matériaux et des semi-fabriqués ; toutes les phases d'élaboration des pièces mécaniques ; le montage des ensembles et des articles ; le transport des matériaux, des ébauches, des pièces et des produits finis jusqu'au service de livraison ou magasin des pièces finies ; le contrôle à tous les échelons de la

fabrication, y compris les essais des ensembles et des produits finis ; le démontage des produits et des ensembles montés, lorsque leur poids ou leur encombrement l'exigent ; l'emballage des produits finis et autres opérations liées à l'élaboration des produits.

On donne le nom de *plan* ou de *gamme de fabrication* à une partie de la gamme de production qui régit directement la transformation successive de l'objet de production.

Ainsi, en construction mécanique la gamme d'usinage est une partie de la gamme de production directement associée à la transformation progressive de l'ébauche, c'est-à-dire à la modification de ses formes géométriques, de ses spécifications dimensionnelles et de la qualité de ses surfaces jusqu'à l'obtention d'une pièce finie déterminée par les prescriptions techniques. Pour réaliser l'usinage d'une ébauche, elle doit être mise en place et bloquée sur une machine-outil. Après l'usinage, l'ébauche doit être débloquée et dégagée de la machine-outil. Ces manipulations (montage et dépose de l'ébauche, mise en marche et arrêt de la machine, etc.) ne changent rien aux formes géométriques, aux dimensions et à la qualité de surface ; pourtant elles sont si étroitement associées à l'exécution de la pièce qu'il est impossible de les envisager isolément de la gamme d'usinage.

Il en est de même pour la gamme d'assemblage, qui est une partie constitutive de la gamme de production liée directement à l'assemblage des ensembles à partir des éléments (montage des ensembles) et l'assemblage du produit fini à partir des groupes et des pièces isolées (assemblage complet).

Pour assembler les éléments d'un produit il faut également réaliser plusieurs manipulations auxiliaires indissolublement liées à l'assemblage des éléments et faisant partie de la gamme de montage (poser la pièce de départ sur un montage, prendre une boulonneuse et la placer sur l'écrou, etc.).

Le traitement thermique, par exemple, entraîne des modifications structurales qui changent les propriétés du matériau de la pièce.

La gamme d'usinage est exécutée aux postes de travail. Un *poste de travail* est un secteur d'atelier dont l'agencement correspond aux travaux qui lui sont affectés.

La gamme d'usinage se compose de phases.

On appelle *phase* une partie de la gamme d'usinage réalisée à un poste de travail et qui comprend toutes les interventions des opérateurs et de l'appareillage que subissent une ou plusieurs pièces façonnées ou montées simultanément.

Ainsi, lors de l'usinage à la machine-outil, une phase comprend toutes les interventions de l'opérateur qui commande la machine, ainsi que les mouvements mécaniques des ensembles de la machine qui assurent le façonnage des surfaces jusqu'au moment où l'ébauche est dégagée pour laisser place à la pièce suivante. Les ébauches peu-

vent être plusieurs et leur usinage peut se faire simultanément (lot de pièces en œuvre).

Une phase compte une ou plusieurs sous-phases.

Une *sous-phase* est la partie d'une phase réalisée entre le serrage et le desserrage d'une ébauche à usiner ou d'un ensemble à monter.

Par exemple, le centrage simultané des deux bouts d'un arbre sur une machine à centrer avec deux poupées symétriques est une phase exécutée en une sous-phase. Le centrage successif des bouts du même arbre sur une machine à centrer avec poupée unique constitue également une phase, mais cette fois elle est exécutée en deux sous-phases, car après le centrage d'un bout l'arbre doit être de nouveau mis en place pour présenter son autre bout à la broche de la machine.

La position d'une ébauche à usiner ou d'un ensemble à assembler serrés sur un montage peut être changée par rapport aux organes d'exécution à l'aide des dispositifs de pivotement; dans ce cas ils subiront des indexages différents.

On appelle *indexage* chacune des positions variées qu'occupe un objet une fois serré par rapport à l'appareillage d'usinage.

Ainsi, l'indexage d'une ébauche usinée sur un tour automatique multibroche change chaque fois que tourne le tambour à broches.

Une phase peut compter une ou plusieurs reprises.

On donne le nom de *reprise* à la partie de la phase prévue pour façonner une surface avec un ou plusieurs outils simultanément au même régime de travail.

Une nouvelle reprise apparaît chaque fois qu'on s'attaque à une autre surface ou si, en façonnant la même surface, on change les outils, ou encore en travaillant la même surface avec les mêmes outils, on change le régime de travail.

Dans le cas de l'assemblage, la reprise est caractérisée par l'action sur les mêmes surfaces à conjuguer et l'utilisation du même outillage.

Lors de la coupe, la reprise peut être effectuée soit en une, soit en plusieurs *passes*. A chaque passe, c'est-à-dire à chaque course de l'outil balayant la surface usinée dans le sens de l'avance, l'outil enlève une couche de matériau. Toutes les passes sont exécutées sans que le régime de travail de la machine-outil change (vitesse de la broche et avance).

La reprise se subdivise en *éléments de travail* dont chacun constitue un ensemble de mouvements ayant pour but de réaliser une tâche précise lors de l'exécution du travail ou lors de sa préparation.

Citons comme exemple la phase d'assemblage exécutée en une reprise « Monter à force la vis hélicoïdale sur l'arbre ». Elle comporte les éléments de travail suivants: prendre l'arbre, le poser sur le dispositif à serrage pneumatique de la presse; bloquer l'arbre; pren-

dre la vis hélicoïdale et la poser sur l'arbre; appuyer sur la pédale pour embrayer la presse ; emmancher à force la vis hélicoïdale sur l'arbre; débrayer la presse; desserrer l'arbre; dégager l'ensemble assemblé du dispositif à serage pneumatique et le placer sur un rayon.

La phase d'usinage « Exécuter les trous de centrage de l'arbre des deux côtés opposés » se fait en deux reprises réalisées simultanément et comporte les opérations suivantes: prendre l'arbre et le positionner suivant la butée sur des vés de serrage de la machine; bloquer l'arbre; embrayer; amener les forêts de centrage en regard des bouts de l'arbre ; exécuter les centres et ramener les broches dans leur position initiale; débrayer la machine ; desserrer l'arbre ; dégager l'arbre centré des vés de serrage et le placer sur un rayon.

La structure de la gamme de production est définie par le programme et la quantité de travail nécessaire pour l'exécution du produit, éléments déterminants du type de production.

En construction mécanique on distingue par convention trois types de fabrication: de masse, en série et unitaire.

La *fabrication de masse* prévoit la sortie continue de produits. Elle est caractérisée par l'exécution à chaque poste de travail d'une seule opération affectée à ce poste et reprise d'une façon continue.

La fabrication de masse fournit des produits de consommation courante similaires d'un type établi fabriqués en grandes quantités, tels que les tracteurs, les automobiles, les bicyclettes, les machines agricoles, les moteurs électriques, les machines à coudre, etc.

Dans la *fabrication en série* la production des pièces se fait par gros lots, et les articles sont sortis par séries se répétant régulièrement. Ce type de production est défini par l'exécution à chaque poste de travail de plusieurs phases reprises périodiquement.

L'objet de la fabrication en série est de sortir des machines d'un type établi. Tels sont les moteurs à combustion interne fixes, les machines-outils, les turbines hydrauliques prévues pour de petites centrales électriques, les pompes, les compresseurs, les grues à tour pour chantiers, etc.

La *fabrication unitaire* des produits est celle qui ne se répète pas ou qui se répète à des intervalles indéterminés. Elle est caractérisée par l'exécution au poste de travail des opérations variées non reprises périodiquement.

C'est le mode de fabrication des machines utilisées à une échelle réduite, exécutées généralement sur commande et devant satisfaire aux prescriptions spéciales. En général, la fabrication unitaire intéresse l'industrie lourde qui sort des turbines hydrauliques puissantes, des machines-outils uniques, des laminoirs, l'équipement métallurgique, etc.

Dans le cas de la fabrication de masse le programme permet de pousser très loin la spécialisation des postes de travail, en n'affectant à chaque poste qu'une seule phase. Ces conditions rendent très aisée l'implantation des machines conformément à la gamme d'usinage.

Une ébauche d'arbre étagé, obtenue par formage par exemple, impose pour son exécution la gamme d'usinage suivante:

1. fraisage des bouts de l'arbre et des centres sur une machine à centrer à deux poupées symétriques (FC);
2. ébauchage d'un côté de l'arbre sur tour semi-automatique à outils multiples (TS);
3. ébauchage de l'autre côté sur tour semi-automatique à outils multiples (TS);
4. finition d'un côté sur tour semi-automatique à outils multiples (TS);
5. finition de l'autre côté sur tour semi-automatique à outils multiples (TS);
6. exécution des rainures sur fraiseuse à rainurer (FR);
7. ébauchage des cannelures sur fraiseuse horizontale semi-automatique avec tête à trois broches (FH);
8. finition des cannelures sur machine semi-automatique à fraiser les cannelures (MFC);
9. perçage des trous latéraux sur perceuse (P);
10. exécution du filetage sur une fraiseuse à fileter (FF);
11. rectification préalable des portées sur rectifieuse cylindrique pour extérieurs semi-automatique (RCE);
12. traitement thermique des portées dans un appareil à courants haute fréquence (CHF);
13. finition sur rectifieuse cylindrique pour extérieurs semi-automatique (RCE);
14. lavage dans un réservoir (RL);
15. vérification au banc d'essai du poste de contrôle (PC).

Après avoir disposé l'équipement dans l'ordre imposé par la gamme d'opérations et prévu en aval du premier poste une place pour ranger les ébauches (*Eb*), et un rayon en amont du poste de contrôle pour les arbres finis (*Fin*), nous obtenons une ligne de fabrication des arbres; dans un atelier la disposition des machines peut être soit rectiligne, soit en zigzag (fig. 11).

Si dans ces conditions le choix et le réglage de l'équipement assurent à tous les postes de travail le rendement requis, nous obtenons un système de fabrication de masse qui s'appelle *ligne continue*.

C'est le cas où chaque poste de travail effectue une phase unique exécutée à une cadence prévue d'avance. On désigne par le terme de cadence la durée d'un phénomène périodique. Lors du travail

à la chaîne, la cadence définit l'intervalle de temps nécessaire pour fabriquer une unité de production.

Pour l'allure de travail de l'atelier considéré, la cadence n'est que fonction du programme imposé; c'est le quotient du temps en minutes par le volume du programme en pièces:

$$t = \frac{T}{N} \text{ mn/pièces}, \qquad (1)$$

où t est la cadence de travail en minutes par pièce;

T, le temps de travail global prévu en minutes (par an, par équipe, etc.);

N, le volume du programme en pièces pendant cette même période de temps.

L'influence exercée par la cadence sur la gamme d'usinage est très importante, car le temps d'usinage par pièce de chaque phase

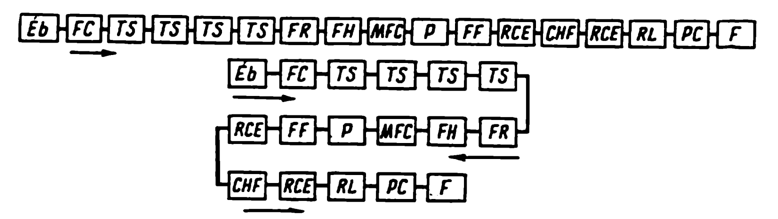


Fig. 11. Variantes d'implantation des lignes de fabrication

doit être réduit soit à la cadence, soit à une grandeur multiple; donc la gamme d'usinage doit être divisée en phases, et dans certains cas, pour assurer la productivité requise, il faut prévoir deux machines au lieu d'une.

Si la cadence n'est pas observée ne serait-ce qu'à un poste de travail, le fonctionnement normal de toute la ligne de fabrication s'en trouve compromis.

Si la productivité d'un poste de travail est inférieure à la norme, il s'accumule à ce poste des ébauches, dont l'usinage n'est pas terminé, ou des ensembles non montés en nombre toujours plus grand. Les postes de travail qui viennent ensuite et dont la productivité est plus élevée dépendent complètement de celui qui les précède, leur service sera donc interrompu par des pauses et la tâche imposée à la chaîne ne sera pas remplie; le poste de travail d'une ligne qui ne remplit pas sa tâche donne lieu à ce qu'on appelle une « lacune » au sein de la chaîne, qui freine la production; cette lacune doit être « comblée » sans retard par telles ou telles mesures.

Lorsque la productivité d'un poste de travail est supérieure à la tâche, le poste en question, dépendant complètement du poste précé-

dent, connaîtra des temps morts, alors que la productivité de la ligne sera toujours conforme à la tâche.

La cadence d'une ligne de fabrication est le terme essentiel de calcul permettant de relier tous les postes de travail des lignes en un corps de production unique.

En cours de fabrication il est impossible d'évincer tous les incidents susceptibles de provoquer des arrêts dans le fonctionnement de certains postes de travail ; pour parer aux arrêts éventuels de toute la ligne il faut donc prévoir des stocks interopérationnels pouvant assurer la marche continue de la chaîne.

Dans le travail à la chaîne, le transfert des ébauches à façonner ou des ensembles à monter d'un poste à un autre suivant l'ordre imposé par la gamme d'usinage est effectué soit à la main (par chariots, rouleaux, gouttières, etc.), soit par un dispositif d'acheminement automatique à action continue ou périodique (convoyeur ou transporteur).

Il est impossible de réaliser des temps d'usinage par pièce égaux ; pour plusieurs phases ils marquent donc généralement des écarts par rapport aux cadences imposées à la ligne provoquant ainsi des temps morts inévitables.

Si la charge des opérateurs est insuffisante, on y supplée par une desserte commune de deux ou trois unités d'équipement de manière que le temps total de cette desserte ne dépasse pas la cadence de la chaîne.

La fabrication pendant un temps plus ou moins long de produits similaires présente des avantages importants.

Lors de la fabrication de masse, la part des frais généraux, très importants à l'échelle de l'atelier et de l'entreprise, se traduit par de très faibles frais par pièce, compte tenu du très grand nombre de produits.

La mise en chaîne des postes de travail rend inutiles les magasins intermédiaires; aussi le volume de la production inachevée diminue-t-il en entraînant la diminution des fonds de roulement. L'exécution à chaque poste des mêmes opérations permet de pousser au maximum la spécialisation, d'élever le rendement et de réduire le cycle de fabrication, accélérant ainsi d'une manière notable le roulement des fonds.

Dans le travail en série la gamme de fabrication est fonction de la nomenclature des produits, du volume de la série et de la quantité de travail nécessaire pour l'exécution des produits; aussi distingue-t-on une fabrication en petites et en grandes séries.

La différence entre la fabrication en petites séries et la fabrication unitaire est très faible ; dans les deux cas le matériel utilisé est essentiellement universel, l'outillage normalisé, le matériel de contrôle universel l'est aussi ; l'implantation des machines-outils se fait d'après leurs types.

La fabrication en grande série, tout en faisant appel à l'équipement universel, utilise également et à une échelle assez large des appareillages spéciaux, ainsi que des machines spéciales à unités d'usinage; l'implantation est régie non par les types de machines, mais par les produits à fabriquer, et dans plusieurs cas par la gamme d'usinage; l'outillage mis en œuvre est soit normalisé, soit spécial, les vérifications se font avec des calibres à limites et des appareils de contrôle spéciaux.

Dans la fabrication en série, le volume du lot (nombre d'ébauches mises en fabrication simultanément) est fonction de plusieurs facteurs de la production et, notamment, de la nomenclature des produits fabriqués et du volume de la production annuelle de chacun de ces produits, des dates prévues pour l'exécution du programme, de la durée de fabrication, du temps nécessaire pour le réglage de l'équipement, etc.

Les avantages techniques et économiques de la fabrication de masse ont conditionné l'application de ses méthodes à la production sérielle.

Pour l'exécution des pièces nécessitant une quantité de travail importante et pour la réalisation du montage complet des ensembles, la fabrication en grande série prévoit la constitution de chaînes similaires à celles de la fabrication de masse.

Des lignes d'usinage sont également constituées lorsqu'il faut assurer le façonnage de plusieurs pièces apparentées quant à leurs construction et gammes d'usinage. Dans les cas courants, lorsqu'il faut passer de la fabrication d'une pièce à celle d'une autre, ces lignes ne demandent pas de temps important pour leur réglage.

La fabrication sérielle n'est pas seule à profiter des enseignements de la production de masse; certains modes opératoires établis par cette dernière sont appliqués avec succès dans le travail unitaire; il en est ainsi notamment pour le dressage simultané des surfaces, assez fréquent dans l'industrie mécanique lourde; en diminuant le cycle d'usinage, on enregistre ainsi un gain important; la division du montage en assemblage complet et en montage des ensembles réalisée dans la fabrication unitaire est justifiée elle aussi, de même que d'autres mesures appliquées dans les fabrications en grande série et de masse.

Il arrive que certains secteurs des usines assurant une fabrication de masse fonctionnent suivant le principe sériel. Ainsi, la machine entière et ses ensembles nécessitant une quantité de travail importante sont assemblés à la chaîne, alors que les ensembles plus simples sont montés par séries. Les pièces à usinage facile sont également exécutées par séries.

Pour subvenir au travail continu d'un équipement à productivité élevée des ateliers de découpage et d'emboutissage des tôles et des

ateliers de forgeage d'une fabrication de masse, le programme doit être très important ; c'est pourquoi dans la plupart des cas de tels ateliers travaillent sur le principe de la production sérielle.

Il est très difficile de délimiter nettement les fabrications en grande série et de masse, car dans ces conditions le type de la production est défini par la nomenclature des produits, la quantité de travail nécessaire pour leur exécution et le programme à remplir. Ce sont les facteurs qui déterminent l'échelle de l'application des principes de la production de masse dans la fabrication en série.

Il est de même impossible de délimiter nettement les fabrications en petite série et unitaire.

La notion de type de production est donc toute conventionnelle. On peut parler de fabrication de masse lorsque l'opération affectée à la majorité des postes de travail est toujours la même, et que les postes de travail sont répartis en fonction de la gamme de fabrication. Mais lorsque les opérations prévues pour la plupart des postes changent pour revenir périodiquement, c'est le terme de fabrication sérielle qui s'impose. L'absence de périodicité dans le fonctionnement des postes de travail caractérise une fabrication unitaire.

CHAPITRE II

Précision en construction mécanique

§ 1. Défauts d'usinage et modes d'obtention des cotes imposées

Notion de précision et de défauts d'usinage. Caractéristique générale des défauts d'usinage des pièces et du montage des machines. Modes d'obtention automatique et individuelle des cotes.

L'expérience de la fabrication des pièces mécaniques et de leur montage a montré que les écarts d'usinage sont inévitables et qu'en réalisant une machine il est impossible d'assurer une précision absolue.

Il en résulte que la position relative des éléments d'une machine ne peut pas être absolument précise même lors d'une vérification statique. La précision des positions relatives des éléments d'une machine est compromise encore plus par les déformations élastiques dues aux sollicitations mécaniques, les déformations thermiques, ainsi que par l'usure normale des pièces en service.

Pour établir l'écart admissible dans la position relative des éléments d'une machine un ingénieur d'étude doit se guider par la destination de la machine conçue et les conditions de son exploitation, compte tenu des déformations éventuelles, de l'usure normale de ses pièces, ainsi que des possibilités de production.

Les écarts admissibles désignés par l'agent d'étude influent sensiblement sur la structure de la gamme de fabrication qui doit assurer la réalisation de la précision requise. D'autre part, le volume d'usinage et la structure de la gamme sont définis par la précision des pièces brutes (laminés, pièces de forge, moulages) et les écarts de leur forme et dimensions de la forme et dimensions des pièces finies.

L'exécution de la gamme d'usinage produit également des écarts dans les dimensions, la géométrie et la position relative des surfaces élémentaires des pièces mécaniques finies. Ainsi, après le façonnage d'un arbre étagé les diamètres réels des épaulements diffèrent plus ou moins des cotes nominales requises; les sections des épaulements enregistrent un écart de circularité, leurs surfaces, un écart de cylindricité; la perpendicularité des bouts de l'arbre par rapport à l'axe de celui-ci ne sera pas absolue; si la gamme d'usinage prévoit non pas une mais deux sous-phases, les axes de ces épaulements peuvent enregistrer un écart de coaxialité. Bref, dans les conditions de la

production, il est impossible de réaliser ne serait-ce que quelques pièces similaires avec une précision absolue.

Les écarts qui se produisent en fabrication sont conditionnés par une multitude de facteurs; l'action de certains d'eux est infime. alors que d'autres augmentent considérablement la valeur de ces écarts.

La position relative de la surface usinée et de l'outil mis à la cote n'est pas constante par suite des refoulements élastiques des ensembles de la machine ; à l'origine de ce phénomène il y a les variations des dimensions des sections des ébauches et des longueurs de ces dernières, ainsi que des propriétés mécaniques de la matière d'œuvre, qui définissent l'instabilité de la force de coupe; il en résulte des écarts dans l'exécution de la cote.

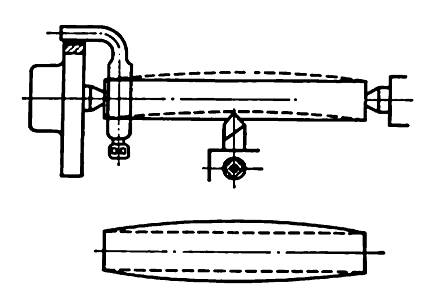


Fig. 12. Déformation d'un arbre lors de son façonnage entre pointes

Les défauts géométriques des machines se répercutent sur les surfaces façonnées. Ainsi, lorsque dans le cas d'un montage en l'air de la pièce le déplacement du chariot sur les glissières d'un banc de tour n'est pas parallèle à l'axe de la broche, on obtient une surface conique au lieu d'une surface cylindrique ; le défaut de perpendicularité des glissières supérieures du chariot par rapport à l'axe de rotation de la broche produit un écart de perpendicularité des bouts dressés de l'arbre par rapport à son axe. Les écarts, qui apparaissent inévitablement lors de chaque nouvelle mise en place de l'ébauche, provoquent des écarts dimensionnels et surtout des défauts de position relative des surfaces façonnées. Par exemple, l'exécution des épaulements d'un arbre en plusieurs sous-phases donne lieu à des écarts de coaxialité.

Lorsque la rigidité des ébauches est insuffisante, leur ablocage produit des déformations élastiques qui compromettent la précision dimensionnelle et géométrique. Si la rigidité d'un arbre monté entre pointes est insuffisante, l'effort de coupe engendre des flexions élastiques susceptibles de fausser la forme cylindrique de l'arbre qui prend la forme d'un tonneau (fig. 12) ; pourtant, d'autres facteurs agissant simultanément fausseront plus ou moins la forme ainsi obtenue.

Plus loin nous étudierons avec force détails les défauts d'usinage et leurs causes. Pour le moment nous nous bornerons à noter que les défauts d'usinage réels sont entachés d'erreurs de mesure dues aux déformations thermiques et élastiques des instruments de mesure et de la pièce mesurée, à la précision du procédé de mesure et des

vérificateurs utilisés, ainsi qu'à des erreurs qui dépendent de l'opérateur.

Même dans les conditions les plus favorables, la température des ateliers varie de 2 à 3°; sur 100 mm de longueur, les erreurs dues à ces variations atteignent 3μ.

Les déformations élastiques s'élèvent, par 1 kg de pression, pour de gros calibres mâchoires jusqu'à 3μ, et pour des instruments plus

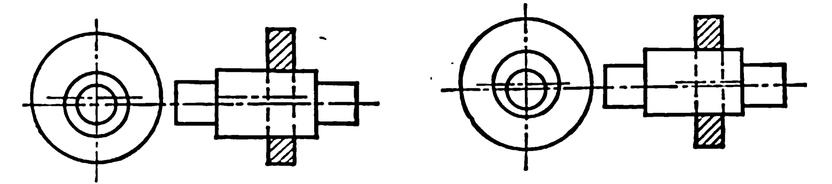


Fig. 13. Battement radial dû à l'excentricité du trou d'une pièce femelle

Fig. 14. Battement radial dû au défaut de coaxialité des fusées d'une pièce mâle

petits jusqu'à 6μ. Lorsqu'une pièce à mesurer est peu robuste, ses déformations élastiques sont assez importantes; il en résulte que des procédés de mesure du diamètre extérieur mal choisis peuvent fausser les résultats, et les lectures de divers instruments ou appareils peuvent s'avérer incompatibles.

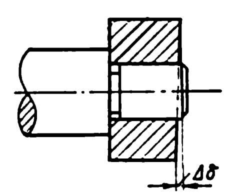


Fig. 15. Déplacement axial périodique résultant du défaut de perpendicularité de la face par rapport à l'axe du trou

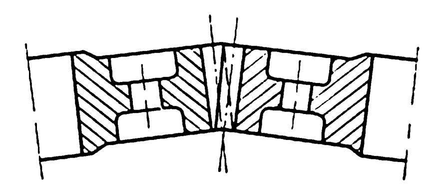


Fig. 16. Engrènement défectueux des roues dentées par suite du défaut de parallélisme des axes des roulements

Les erreurs d'usinage des pièces mécaniques entraînent des erreurs de montage; il en est ainsi notamment pour les erreurs dimensionnelles des surfaces conjuguées, qui, en changeant les jeux et les serrages, perturbent l'ajustement; il en est de même pour les erreurs géométriques des surfaces conjuguées; les écarts de position relative des surfaces engendrent un battement radial résultant de l'excentricité d'alésage de la pièce femelle (fig. 13) ou d'un défaut de coaxialité de la pièce mâle (fig. 14); un déplacement axial périodique Δ_δ résultant du défaut de perpendicularité de la face de la pièce femelle par rapport à l'axe d'alésage (fig. 15); un engrènement défectueux

des roues dentées résultant du défaut de parallélisme des axes des roulements (fig. 16), etc.

Les écarts des cotes, des jeux et des serrages mis en évidence au cours du montage sont définis par la résolution des séries dimensionnelles.

L'erreur résultante que présente le terme final de la série est égale à la somme des erreurs propres à tous les termes antérieurs de cette série

$$\omega_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \omega_i. \qquad (2)$$

Si on passe des erreurs aux tolérances, la tolérance sur le terme final de la série des dimensions constitue la somme des valeurs absolues des tolérances de tous les termes précédents; donc

$$\delta_\Delta = \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i, \qquad (3)$$

où δ_Δ est la valeur de la tolérance du terme final de la série des dimensions;

δ_i, la valeur de la tolérance du i^e terme de la série;

m, le nombre total de tous les termes, y compris le terme final.

Ainsi, la valeur de la tolérance du terme final de la série est définie par la somme des valeurs absolues des tolérances de tous les autres termes à l'exception du terme final.

En plus des défauts des pièces mécaniques résultant des erreurs d'usinage on constate en montage l'apparition des écarts indépendants de la précision d'exécution des pièces. Ils sont dus essentiellement aux gauchissements, c'est-à-dire aux déplacements angulaires des pièces produits en montage par des décalages par rapport aux orientations imposées (pose incorrecte, serrage défectueux des boulonnages, etc.). Ainsi, les erreurs de montage se traduisent par des écarts dimensionnels et des défauts de position.

L'erreur cumulée des défauts de position des pièces mécaniques et des défauts de position apparus lors du montage est définie non seulement par leur grandeur, mais aussi par leur direction, c'est-à-dire comme une somme géométrique.

La fig. 17 schématise la constitution de l'erreur cumulée du montage.

Une bague ayant un défaut sous forme d'excentricité est logée dans un corps avec jeu et bloquée par une vis.

La somme géométrique de l'erreur cumulée c s'écrit:

$$\bar{c} = \bar{a} + \bar{b} = \sqrt{a^2 + b^2 + 2ab\cos(\bar{a}\,\bar{b})}, \qquad (4)$$

où $\bar{b}$ est le vecteur définissant le défaut de position de la pièce (excentricité) ;

$\bar{a}$, le vecteur définissant le défaut de position apparu en montage (décalage défini par la grandeur du jeu d'ajustement) ;

$(\bar{a}\bar{b})$, l'angle entre le vecteur $\bar{b}$ et le vecteur $\bar{a}$.

Les erreurs de montage admissibles doivent être établies en fonction des tolérances de position imposées aux organes du mécanisme assemblé.

Dans les conditions de production, la réalisation des spécifications dimensionnelles dans les limites des tolérances prévues peut être effectuée soit par un procédé automatique, soit par un procédé unitaire d'obtention des cotes requises.

Dans le *procédé d'obtention automatique des cotes requises* les travaux sont effectués sur des machines réglées d'avance et l'opérateur n'influe pas directement sur les cotes à obtenir.

Fig. 17. Représentation schématique de l'erreur cumulée de déplacement des axes d'une bague et d'un trou lors du montage dans le corps

Ce procédé intéresse tous les modes d'estampage et de fonderie, à l'exception du moulage en sable à la main lorsque l'ébranlage du modèle effectué pour le dégager du moule et la retouche à la truelle de la surface du moule perturbent l'automaticité d'obtention des cotes requises.

Le procédé d'obtention automatique des cotes prévoit le façonnage des pièces brutes sur des machines réglées à l'avance, c'est-à-dire par des outils mis à la cote au préalable et dont le réglage reste le même pour tout le lot d'ébauches jusqu'à la relève ou jusqu'à la retouche de réglage.

De plus, ce procédé exige la mise en œuvre des montages et un réglage plus compliqué de la machine que dans les cas courants. On élimine ainsi complètement le traçage des ébauches et leur dégauchissage.

C'est le procédé auquel se rapporte le montage fondé sur le principe d'interchangeabilité.

Le procédé d'obtention automatique des cotes est appliqué dans les fabrications en série et de masse ; la similitude des pièces ainsi obtenues et la précision de leurs spécifications correspondent aux tolérances prévues.

Le *procédé d'obtention unitaire des cotes requises* est caractérisé par des erreurs résultant essentiellement de la dextérité de l'opérateur et de ses aptitudes professionnelles.

Parmi les modes de fabrication qui correspondent à ce procédé citons le forgeage libre et le moulage à la main dans des moules en sable. Lors du forgeage libre, les défauts de la pièce sont surtout fonction des aptitudes professionnelles du forgeron qui respecte les spécifications dimensionnelles et géométriques en effectuant des mesures pendant l'opération.

Lors du forgeage libre de plusieurs pièces identiques, leurs dimensions et formes géométriques diffèrent nettement d'une pièce à l'autre.

Il en est de même dans le moulage à la main dans lequel les aptitudes professionnelles de l'opérateur définissent la précision de l'exécution du moule, et notamment, la qualité du rembourrage, la valeur de l'ébranlage nécessaire pour dégager le modèle, les erreurs de retouche à la truelle de la surface du moule en sable.

Pour l'exécution des pièces par le procédé d'obtention unitaire des cotes, les machines ne sont pas réglées à l'avance et les spécifications dimensionnelles sont observées à l'aide de passes d'essai et de mesures. L'opérateur procède par passes d'essai d'une petite longueur qu'il mesure chaque fois jusqu'à ce que soit obtenue la cote requise ; puis il façonne la pièce sur toute la longueur en respectant la cote réalisée par la dernière passe. Il est évident que la précision de ce procédé dépend notamment de l'habileté de l'ouvrier et de l'erreur de mesure ; il en résulte que chaque pièce similaire du lot obtenu par ce procédé a ses dimensions et donc une différence des cotes plus ou moins grande.

Il n'est pas rare que le procédé d'obtention unitaire des cotes requises nécessite le dégauchissage de chaque ébauche, et donc son traçage préalable.

C'est le procédé auquel correspond le montage par ajustage des pièces mécaniques conjuguées.

Le procédé d'obtention unitaire des cotes ne peut être appliqué que par une main-d'œuvre qualifiée, le volume de travail étant élevé et la précision très poussée ; aussi n'y recourt-on généralement que dans la fabrication unitaire et parfois dans la fabrication en petite série ; ce procédé permet de réaliser de très bons ajustements et une précision élevée de la position des organes des mécanismes.

Dans l'industrie lourde il est d'usage de travailler suivant le principe de la cotation de liaison. Ce procédé consiste à façonner d'abord une pièce, à la mesurer soigneusement et à porter toutes ses cotes sur une fiche ; les cotes de la pièce conjuguée sont établies en fonction de celles de la pièce déjà fabriquée compte tenu des jeux et des serrages requis.

Certes, c'est là un procédé d'obténtion unitaire des cotes puisque pour le réaliser on procède par des passes d'essai et des mesures. La rectification est également réalisée suivant le procédé d'obtention unitaire des cotes quel que soit le type de production.

Une meule s'use rapidement. Les intervalles entre ses dressages sont donc très courts, car la précision doit être très élevée ; le dressage impose donc des retouches à la mise en place de la meule et l'exécution de la cote imposée par des passes d'essai et des mesures. Dans ces conditions, l'obtention unitaire des cotes a lieu indépendamment du mode de mesure et de la mise à profondeur de la meule ; l'opérateur peut procéder soit à la main en arrêtant la machine, soit à l'aide du matériel automatique (calibres mâchoires, tampons) et de la régulation automatique, la machine poursuivant son fonctionnement. Dans les deux cas, la position de l'outil ne reste pas constante pendant le façonnage de tout le lot d'ébauches, elle est corrigée en cours d'exécution en partant des données fournies par des mesures d'essai. L'obtention automatique de la cote n'est possible que dans le cas de rectification en plongée (par meule mise à la cote).

Comme nous l'avons déjà dit, le choix des procédés d'obtention des cotes est défini par le volume de production et les considérations techniques et économiques.

L'application des mesures appropriées permet de réduire les défauts d'usinage (quel que soit le procédé d'obtention des cotes) à des écarts prescrits par l'étude de la précision imposée des mécanismes et des machines à fabriquer.

§ 2. Ablocage des pièces sur les machines

Surfaces considérées lors de l'ablocage des pièces. Notion d'éléments d'appui et de tenue, de positionnement et d'éléments de référence. Traits particuliers du positionnement dans les procédés d'obtention automatique et unitaire des cotes. Notion de défaut de positionnement. Principe de coïncidence des éléments d'appui et de référence. Principe de constance d'élément d'appui. Avantages de la mise en place des pièces sur des appuis ponctuels. Disposition des éléments d'appui. Notion d'élément de montage. Rapports entre les éléments de montage, d'appui et de référence. Considérations qui guident le choix des surfaces d'appui.

Défauts dus au serrage des pièces lors de leur ablocage.

Cumulation des défauts de positionnement et de fixation.

Etude géométrique des liaisons entre la cotation fonctionnelle et la cotation de fabrication. Ablocage des pièces sans dégauchissage ou avec dégauchissage d'après la surface usinée. But du traçage. Dégauchissage suivant le traçage et les surfaces usinées. Domaines d'application du traçage et de l'ablocage avec dégauchissage.

Parmi les causes des défauts d'usinage et des écarts de position des éléments géométriques d'une ébauche, signalons celle d'une mise en place (ablocage) défectueuse. C'est pourquoi l'étude des défauts

de mise en place s'impose, ainsi que celle de leur action sur la précision d'usinage et les principes qu'il faut observer lors de l'ablocage d'une pièce sur une machine.

Lors de la mise en place d'une pièce sur une machine il convient de distinguer : a) les surfaces à usiner soumises à l'action des outils ; b) les surfaces qui permettent d'orienter l'ébauche par rapport à l'outil mis à la cote dans le cas du procédé d'obtention automatique des cotes, ou par rapport aux organes d'exécution de la machine dans le cas du procédé d'obtention unitaire des cotes ; c) les surfaces soumises à l'action des dispositifs de serrage ; d) les surfaces de référence pour les mesures des cotes à respecter ; e) les surfaces libres, c'est-à-dire celles qui ne sont pas utilisées pour l'ablocage considéré.

Les surfaces, lignes et points de l'ébauche, qui assurent sa mise en place lors de l'usinage sur une machine, s'appellent *éléments d'appui* ou *de tenue*, alors que la mise en place de l'ébauche, définie par ces éléments, porte le nom de *positionnement*.

Les surfaces, lignes et points à partir desquels on effectue la mesure des cotes sont dits *éléments de référence*.

Lors de la mise en place, la disposition des organes d'ablocage, des brides et des butées est déterminée par les surfaces usinées, les éléments d'appui et les éléments de référence, ainsi que par la direction dans laquelle agit la force de coupe.

On distingue 1) la mise en place prévue pour le procédé d'obtention automatique des cotes, lorsque la position des éléments de référence par rapport à l'outil mis à la cote influe directement sur la tolérance de la cote imposée ; 2) la mise en place prévue pour le procédé d'obtention unitaire des cotes, lorsque la position des éléments de référence par rapport à l'outil n'influe pas sur la tolérance de la cote imposée, car cette cote est obtenue par des passes d'essai et des mesures effectuées directement à partir de l'élément de référence.

Considérons comment change la position de l'élément de référence pour l'usinage d'un lot d'ébauches par le procédé d'obtention automatique des cotes en fonction du positionnement adopté.

Des *montages d'usinage spéciaux* [1] s'imposent dans ce cas ; ce sont des dispositifs constitués d'organes de calage, de serrage et de guidage de l'outil, montés sur un corps unique et communiquant à l'ébauche une position bien définie par rapport à l'outil mis à la cote.

Parfois les montages d'usinage spéciaux sont dotés d'organes de pivotement ou de division, d'extracteurs ou de chasse-pièces pour assurer l'évacuation des ébauches finies, et d'autres accessoires.

---

[1] A l'exception de l'usinage des pièces qui constituent des corps de révolution repérés essentiellement par des accessoires normalisés adjoints aux machines-outils ou par des appareils universels.

Le procédé d'obtention automatique des cotes prévoit un réglage préalable de la machine, c'est-à-dire la mise à la cote des outils et des montages qui permet d'obtenir automatiquement les cotes imposées.

Dans ces conditions, la position relative de l'outil et du montage reste la même jusqu'au réglage de l'outil compromis par son usure ou le réglage de la machine imposé par le remplacement d'un outil émoussé. Lors de l'ablocage des ébauches sur un montage, le dégauchissage devient inutile, car elles prennent une position bien définie par rapport à l'outil mis à la cote.

La fig. 18 représente le schéma de la mise en place de l'ébauche D prévue pour le défonçage d'une rainure avec une fraise Fr. Les éléments de mise en place du montage sont A_1, A_2 et A_3 (appuis); G_1 et G_2, butées qui guident l'ébauche par rapport à la fraise Fr pour respecter la cote a; BL, butée longitudinale; F, serrage. La mise à la cote de la fraise prévoit A = const par rapport aux éléments de guidage du montage et C = const par rapport à ses éléments d'appui. Pour un lot d'ébauches les cotes B et H varient de B_{min} à B_{max} et de H_{min} à H_{max} dans les limites des tolérances admissibles. Quelles que soient les variations de la cote B, les liaisons géométriques permettent d'établir que $a = A$ = const; dans ce cas les éléments de mise en place et de référence se confondent; c'est pourquoi les variations des cotes a et b des ébauches du lot façonné ne sont dues qu'aux phénomènes résultant de l'usinage (refoulement, usure de la fraise, etc.), car dans le cas considéré la mise en place de l'ébauche assure la constance de la cote a.

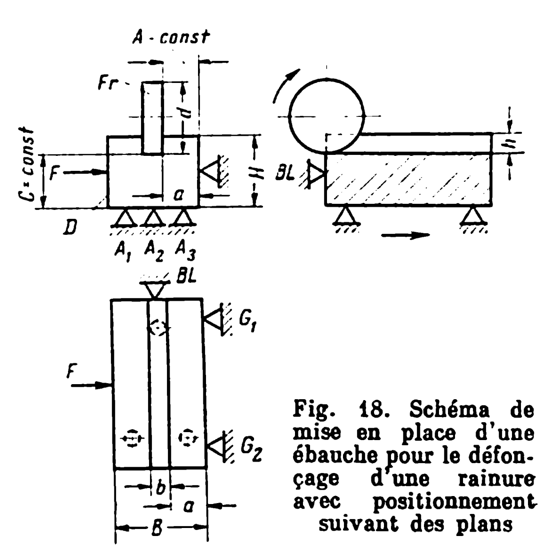


Fig. 18. Schéma de mise en place d'une ébauche pour le défonçage d'une rainure avec positionnement suivant des plans

Il en est autrement pour la profondeur h de la rainure. La modification de la position du plan de référence accroît le défaut d'usinage résultant des refoulements élastiques de la fraise, de son usure progressive et d'autres facteurs intervenant en coupe. Les valeurs limites des déplacements du plan de référence par rapport à l'outil mis à la cote sont définies par les relations géométriques sui-

vantes:

$$h_1 = H_{max} - C,$$
$$h_2 = H_{min} - C,$$

d'où il vient

$$h_1 - h_2 = H_{max} - H_{min}$$

ou

$$\varepsilon_h = \delta_H, \quad (5)$$

où ε_h est le défaut de positionnement, c'est-à-dire la différence des distances limites entre le plan de référence et l'outil mis à la cote;

δ_H, la tolérance prévue pour la cote H de l'ébauche.

Lorsque les éléments d'appui et de référence ne se confondent pas, l'erreur de positionnement à partir des surfaces planes est pour la cote à exécuter ε_h égale à la tolérance prévue sur la cote δ_H, qui associe les éléments d'appui et de référence.

Ainsi, l'erreur cumulée pour la cote à observer ω_h est composée du défaut d'usinage τ_h et du défaut de positionnement ε_h:

$$\omega_h = \tau_h + \delta_H.$$

Pour défoncer une rainure selon la fig. 18 par le procédé d'obtention unitaire des cotes, chaque ébauche est dégauchie puis serrée sur la table de la machine de façon que sa surface latérale soit parallèle au sens de l'avance; la fraise est alors mise à la cote A par des passes d'essai; il est alors possible de respecter la cote a sur toute la longueur.

Dans ces conditions, la position de la surface de référence par rapport à l'outil n'a aucune importance, car pour chaque ébauche à façonner l'outil est mis à la cote directement à partir du plan de référence à l'aide de passes d'essai et de mesures; la cote h est ainsi respectée quelle que soit la cote réelle H. L'erreur de la cote à réaliser ω_h n'est définie alors que par le défaut d'usinage τ_h:

$$\omega_h = \tau_h.$$

Dans le cas d'obtention automatique des cotes, les conclusions à tirer peuvent être les suivantes:

1. Lorsque les éléments d'appui et de référence se confondent, le défaut de positionnement n'a pas lieu ($\varepsilon_h = 0$). Aussi, en procédant au positionnement s'efforce-t-on toujours de faire coïncider les éléments d'appui et de référence, c'est-à-dire d'adopter pour élément d'appui celui utilisé pour la mesure de la cote requise.

2. Lorsque les éléments d'appui et de référence ne se confondent pas, le défaut de positionnement est défini par la différence des distances limites entre la surface de référence et l'outil mis à la cote.

Lorsque le positionnement opéré suivant une surface de révolution extérieure prévoit la mise en place sur un vé pour l'exécution d'un surfaçage ou d'une rainure (fig. 19), les écarts limites de l'élément de référence A' et A'' par rapport à l'outil mis à la cote A''' sont définis par la grandeur $A'A''$ ou par la différence $h_1 - h_2$; alors

$$\varepsilon_h = h_1 - h_2 = A'A'' = OA' - OA'';$$

$$OA' = OC' + C'A' = $$

$$= \frac{C'K'}{\sin\frac{\alpha}{2}} + C'A' = \frac{D_{max}}{2\sin\frac{\alpha}{2}} + $$

$$+ \frac{D_{max}}{2} = \frac{D_{max}}{2}\left(\frac{1}{\sin\frac{\alpha}{2}} + 1\right);$$

par analogie

$$OA'' = \frac{D_{min}}{2}\left(\frac{1}{\sin\frac{\alpha}{2}} + 1\right);$$

$$OA' - OA'' = \frac{\delta_D}{2}\left(\frac{1}{\sin\frac{\alpha}{2}} + 1\right);$$

donc,

$$\varepsilon_h = \frac{\delta_D}{2}\left(\frac{1}{\sin\frac{\alpha}{2}} + 1\right), \qquad (6)$$

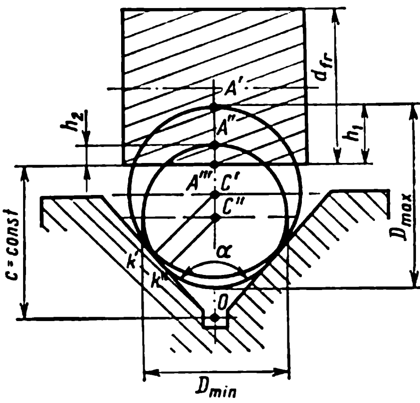


Fig. 19. Schéma de mise en place d'une ébauche pour la taille d'un méplat avec positionnement suivant une surface cylindrique

où ε_h est le défaut de positionnement qui influe sur la tolérance de la cote;

δ_D, la tolérance sur le diamètre de l'ébauche;

α, l'angle du vé.

Si le dressage simultané des bouts pour la mise à la cote a est exécuté lorsque la pièce est montée entre pointes (pointe rigide), le défaut de positionnement ne fausse pas la cote a à exécuter, mais influe sur la tolérance de la cote b, qui représente la distance jusqu'au bout gauche de l'arbre, plan de référence pour cette cote (fig. 20). Les outils sont mis aux cotes A = const et C = const. Si les centres de toutes les ébauches étaient absolument identiques, la cote b serait constante pour tout le lot. Mais les défauts d'exécution quant à la profondeur du centrage font que les diamètres des centres varient de D_{max} à D_{min}, ce qui fait varier la distance entre le plan de référence (bout gauche de l'arbre) et l'outil mis à la cote C = const. Ainsi, la valeur du défaut de positionnement par rapport à la cote b est définie par des relations géométriques (fig. 21):

$$\varepsilon_{cen} = \frac{\delta_A}{2\,\mathrm{tg}\alpha}, \qquad (7)$$

où ε_{ccn} est la différence entre les distances limites du bout de l'ébauche et le sommet de la pointe, c'est-à-dire le défaut de positionnement ou l'enfoncement de la pointe $\varepsilon_{cen} = a_2 - a_1$;
δ_A, la tolérance sur le diamètre de la partie conique des centres;
α, le demi-angle au sommet du cône.

Lorsque les pointes sont remplacées, la tolérance sur le diamètre de leur partie conique n'influe pas sur le défaut de positionnement,

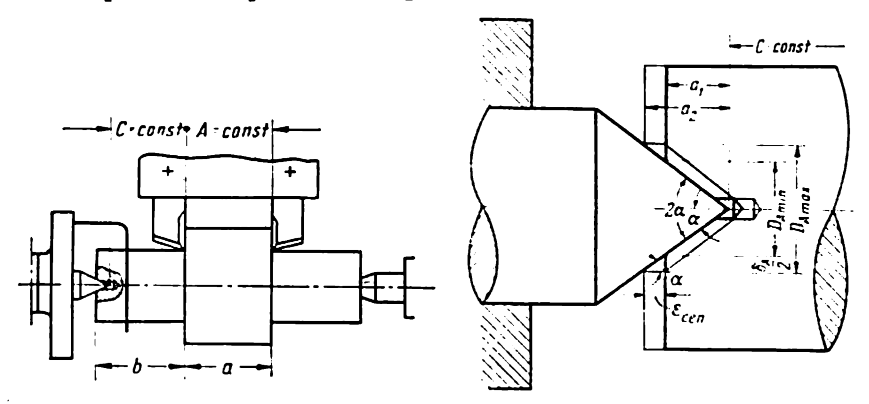


Fig. 20. Ablocage d'une ébauche à l'aide d'une pointe rigide

Fig. 21. Enfoncement des pointes en fonction de la tolérance sur la cote du centre (la section au droit de la conjugaison de la pointe et du centre n'est pas hachurée par convention)

car le remplacement des pointes entraîne toujours un nouveau réglage de la machine, qui de toute façon permet de respecter la distance $C =$ const.

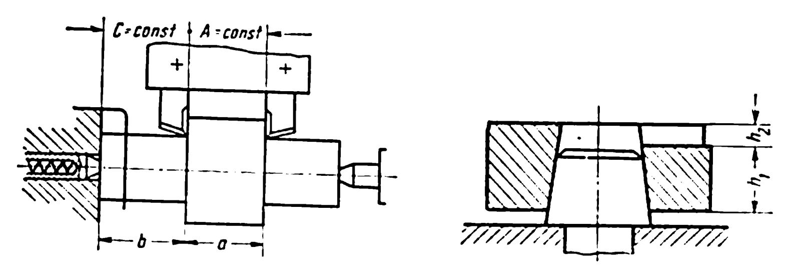


Fig. 22. Positionnement d'une ébauche sur la pointe à ressort

Fig. 23. Positionnement suivant un alésage conique sur un doigt conique rigide

Lorsque l'ablocage prévoit une pointe à ressort (fig. 22), la position du bout gauche de l'arbre pour tout le lot d'ébauches est définie

par la butée ; elle est donc constante par rapport aux outils mis aux cotes C = const et A = const. Les plans d'appui et de référence sont confondus et donc $\varepsilon_b = 0$.

Par analogie pour les cotes h_1 et h_2 (fig. 23), le défaut de positionnement lors de l'exécution d'une rainure dans une pièce mise en place par un alésage conique sur un doigt conique rigide est défini par l'expression

$$\varepsilon_{h_1} = \varepsilon_{h_2} = \frac{\delta_A}{2 \operatorname{tg} \alpha},$$

où δ_A est la tolérance sur le diamètre de l'alésage conique de tenue ;
α, le demi-angle au sommet du cône.

Dans le cas d'un doigt conique à ressort (fig. 24) :

$$\varepsilon_{h_1} = 0, \quad \varepsilon_{h_2} = \delta_H,$$

où δ_H est la tolérance sur la cote H.

Lorsque la pièce représentée sur la fig. 25 est montée sur un mandrin rigide avec ajustement libre, positionnée d'après un alésage cylindrique et fixée par un écrou pour le dressage de la surface supérieure, le décalage de l'axe d'alésage par rapport à l'axe du mandrin est maximal pour un

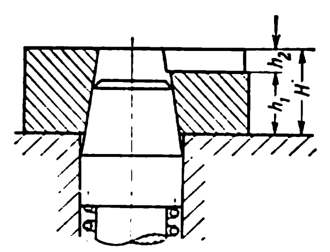


Fig. 24. Positionnement suivant un alésage conique sur un doigt conique à ressort

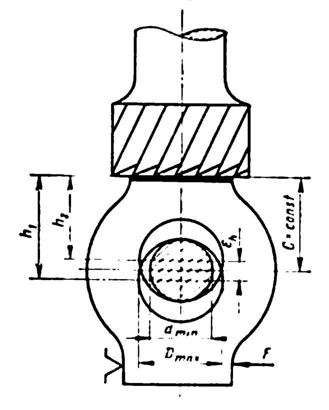


Fig. 25. Positionnement suivant un alésage cylindrique sur un mandrin rigide avec ajustement libre pour l'exécution d'un plan

diamètre d'alésage maximal (D_{max}) et un diamètre de mandrin minimal (d_{min}). Aussi les liaisons géométriques de la fig. 25 montrent-elles que la mise de l'outil à la cote C = const donne

$$\varepsilon_h = h_1 - h_2;$$

$$h_1 = C + \frac{D_{max} - d_{min}}{2} = C + \frac{S_{max}}{2};$$

$$h_2 = C - \frac{D_{max} - d_{min}}{2} = C - \frac{S_{max}}{2};$$

où S_{max} est le jeu maximal ; donc

$$\varepsilon_h = \left(C + \frac{S_{max}}{2}\right) - \left(C - \frac{S_{max}}{2}\right) = S_{max}.$$

On sait que

$$S_{max} = S_{min} + \delta_A + \delta_B,$$

d'où il vient

$$\varepsilon_h = S_{min} + \delta_A + \delta_B, \qquad (8)$$

où S_{min} est le jeu minimal assuré, choisi suivant les normes;
δ_A, la tolérance sur le diamètre de l'alésage de tenue;
δ_B, la tolérance sur le diamètre du mandrin.

Dans le cas de la fixation avec serrage sur un mandrin rigide ou d'un montage sur un mandrin extensible, les jeux et l'excentrage de l'alésage et du mandrin n'existent pas et le défaut de positionnement n'a donc pas lieu ($\varepsilon_\delta = 0$).

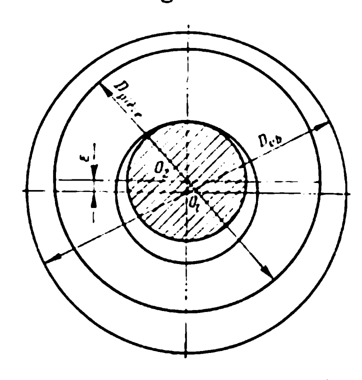


Fig. 26. Positionnement suivant un alésage cylindrique sur un mandrin rigide avec ajustement libre pour le façonnage d'une surface cylindrique

Le déplacement de l'axe de l'alésage O_1 d'une grandeur ε par rapport à l'axe du mandrin O_2 est également possible dans le cas de l'exécution des surfaces de révolution (fig. 26) par montage de l'ébauche $D_{éb}$ sur un mandrin rigide et son positionnement d'après l'alésage avec ajustement libre et serrage par écrou ; ce défaut de positionnement ne compromet pourtant pas la tolérance sur le diamètre, car la surface de révolution est générée autour de l'axe O_2 indépendamment de la grandeur et du sens de déplacement de l'axe de l'ébauche O_1 par rapport à l'axe de rotation du mandrin O_2. Il en résulte un écart de position qui définit l'excentricité de la surface de révolution $D_{pièce}$ par rapport à l'alésage.

Examinons les défauts de positionnement lors de l'exécution consécutive des cotes a, b et h des plans d'une ébauche représentée sur la fig. 27. Le procédé d'obtention des cotes est automatique.

Le plan inférieur et les plans latéraux k et l déjà dressés sont choisis comme éléments d'appui ; la cote A entre l'axe de l'ébauche et le plan k est observée dans les limites de la tolérance δ_A. La cote A est imposée par l'agent de méthodes de façon que la cote a ne dépasse pas les limites établies par la tolérance.

Pour calculer les défauts de positionnement faisons appel aux relations principales des séries de dimensions [formules (2) et (3)]

et examinons-les pour chaque reprise de l'ébauche usinée sur une machine-outil.

Pour l'exécution de la cote a orientons l'ébauche suivant le plan latéral k (fig. 28). La série des dimensions donne

$$\varepsilon'_a = \delta_C + \delta_A ;$$

puisque C = const, $\delta_C = 0$; il s'ensuit que $\varepsilon'_a = \delta_A$, c'est-à-dire le défaut de positionnement dans ce cas est égal, comme on le sait, à la tolérance sur la cote qui associe les éléments d'appui et de référence.

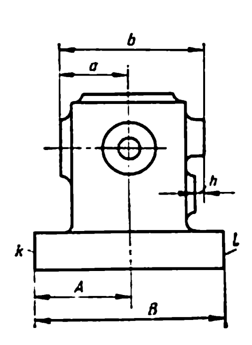


Fig. 27. Pièce à surfaces planes usinées pour respecter les cotes a, b et h

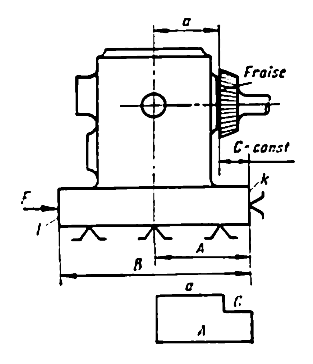


Fig. 28. Usinage d'une pièce pour respecter la cote a avec positionnement suivant le plan k

Pour respecter lors de l'usinage la cote b, prenons comme élément d'appui le plan latéral l (fig. 29). Dans ce cas la série des dimensions donne

$$\varepsilon'_b = \delta_B + \delta_A + \delta_a .$$

Pour l'exécution de la cote h, adoptons toujours le même principe de mise en place (fig. 30) ; le même mode de calcul nous permet alors de tirer :

$$\varepsilon'_h = \delta_B + \delta_A + \delta_a + \delta_b .$$

Si la pièce est orientée dans les trois cas d'exécution des cotes a, b et h suivant le plan latéral k, les défauts de positionnement sont tout autres.

Pour la cote a (fig. 28) :

$$\varepsilon''_a = \delta_A, \text{ c'est-à-dire } \varepsilon''_a = \varepsilon'_a ;$$

pour la cote b (fig. 31) :

$$\varepsilon''_b = \delta_a + \delta_A, \text{ c'est-à-dire } \varepsilon''_b < \varepsilon'_b ,$$

car

$$\delta_a + \delta_A < \delta_B + \delta_A + \delta_a ;$$

pour la cote *h* (fig. 32) :

$$\varepsilon''_h = \delta_b + \delta_a + \delta_A, \text{ c'est-à-dire } \varepsilon''_h < \varepsilon'_h,$$

car

$$\delta_b + \delta_a + \delta_A < \delta_B + \delta_A + \delta_a + \delta_b.$$

Ainsi, dans les deux derniers cas (fig. 31 et 32), le défaut de positionnement a diminué jusqu'à la grandeur de la tolérance sur la

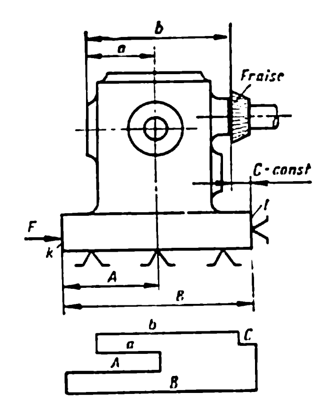


Fig. 29. Usinage d'un plan pour respecter la cote *b* avec positionnement suivant le plan *l*

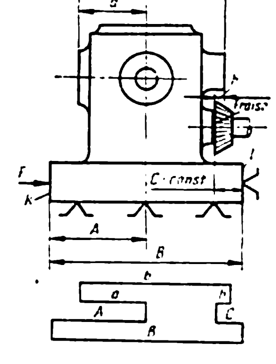


Fig. 30. Usinage d'un plan pour respecter la cote *h* avec positionnement suivant le plan *l*

cote *B*, c'est-à-dire la grandeur δ_B. Cette diminution du défaut résulte de l'utilisation de la même surface d'appui pour la mise des trois plans aux cotes *a*, *b* et *h*.

L'étude des défauts de positionnement résultant de divers procédés d'usinage des ébauches variées avec application des éléments d'appui constants et variables nous permet de conclure qu'un élément d'appui constant diminue toujours le défaut de positionnement.

Les schémas de principe des mises en place (des fig. 28, 31 et 32) diminuent, comme nous l'avons vu, le défaut de positionnement; leur usage est donc très fréquent dans les conditions de production. Toutefois l'effet peut être plus important si on utilise un élément d'appui constant avec un autre schéma de principe de la mise en place.

En réalisant le repérage de l'ébauche (fig. 33) par rapport à la fraise mise à la cote par deux trous de tenue (absents sur le dessin) percés dans la surface d'appui inférieure et les chevilles de calage, on obtient de meilleurs résultats comparativement aux fig. 28, 31 et 32.

La mise en place selon la fig. 33 donne $\varepsilon_a''' = \delta_{A'}$. Le perçage des trous de tenue à travers un guide, leur alésage ultérieur et l'exé-

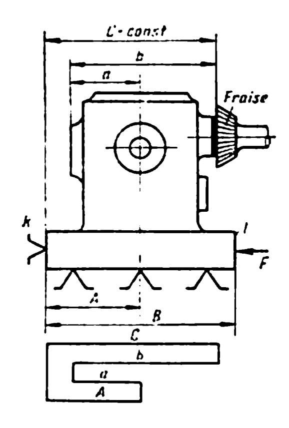


Fig. 31. Usinage d'un plan pour respecter la cote *b* avec positionnement suivant le plan *k*

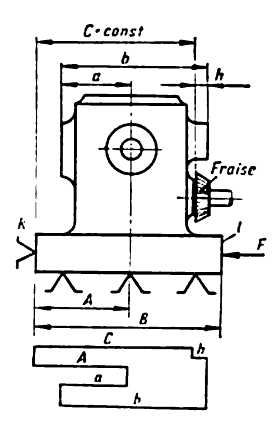


Fig. 32. Usinage d'un plan pour respecter la cote *h* avec positionnement suivant le plan *k*

cution des goupilles de calage avec une précision élevée assurent une tolérance beaucoup plus serrée pour la cote A' que pour la cote A.

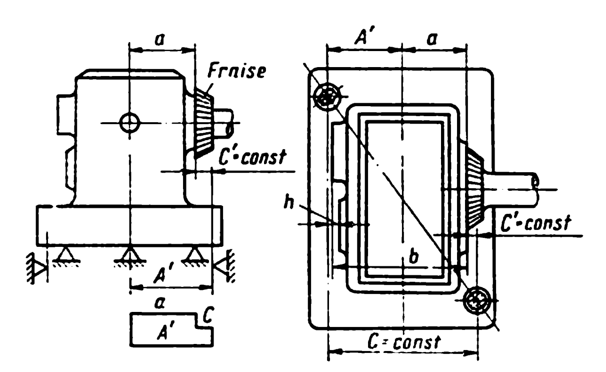


Fig. 33. Usinage d'un plan pour respecter la cote *a* avec positionnement sur deux chevilles de calage suivant le plan inférieur et ses deux trous de tenue

Aussi $\delta_{A'} < \delta_A$ et $\varepsilon_a''' < \varepsilon_a''$, c'est donc le cas où, toutes les autres conditions étant les mêmes, la cote a est réalisée avec une tolérance plus serrée que dans les cas précédents, c'est-à-dire $\delta_a''' < \delta_a''$.

Lors de la mise à la cote *b* du plan de la figure 34, la série des dimensions permet d'écrire :

$$\varepsilon_b''' = \delta_{A'} + \delta_a,$$

car $\delta_{A'} < \delta_A$ et $\delta_a''' < \delta_a''$, $\varepsilon_b''' < \varepsilon_b''$, et donc $\delta_b''' < \delta_b''$.

La mise à la cote *h* du plan (fig. 35) donne

$$\varepsilon_h''' = \delta_{A'} + \delta_a + \delta_b$$

et donc

$$\varepsilon_h''' < \varepsilon_h''.$$

Dans le deuxième (fig. 31 et 32) et le troisième cas (fig. 33) le choix des éléments d'appui constants se traduit par des relations

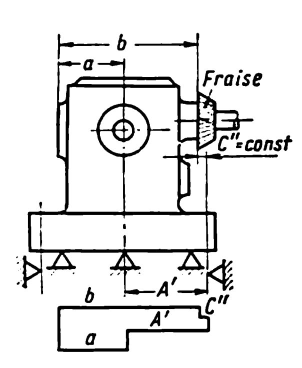


Fig. 34. Usinage d'un plan pour respecter la cote *b* avec positionnement suivant la fig. 33

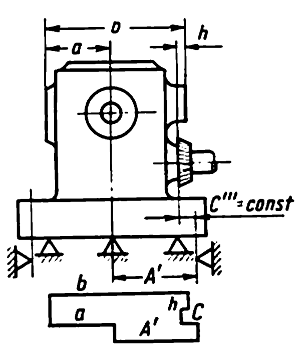


Fig. 35. Usinage d'un plan pour respecter la cote *h* avec positionnement suivant la fig. 33

en principe analogues définissant les défauts de positionnement, mais le principe de la mise en place adopté modifie les valeurs faisant partie de ces relations.

Au cours de l'exécution de la gamme d'usinage chaque changement des éléments d'appui produit de nouvelles erreurs dues aux défauts de positions relatives des éléments d'appui ; il est donc évident qu'un élément d'appui constant est plus avantageux.

Le principe de constance d'un élément d'appui consiste à exécuter toutes les phases de la gamme d'usinage à partir d'un élément de départ unique. A cet effet, on procède à l'analyse des mises en place éventuelles pour choisir celle qui, l'élément d'appui étant constant, assure un défaut de positionnement minimal et une exécution des cotes suivant des tolérances plus rigoureuses.

Dans tous les cas, la valeur du défaut de positionnement peut être calculée sur la base des liaisons géométriques définies par le principe de la mise en place.

Comme tout solide libre, l'ébauche à usiner compte six degrés de liberté déterminés par les mouvements rectilignes dans le sens des trois axes de coordonnées respectivement perpendiculaires et trois mouvements angulaires autour de ces axes. C'est ce qui guide le choix et la position relative des éléments d'appui ; ainsi, le choix des éléments d'appui (fig. 18), des dispositifs de serrage et de l'effort de coupe fait que la position de l'ébauche par rapport à l'outil est stable et bien définie.

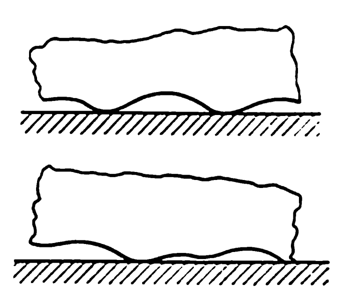
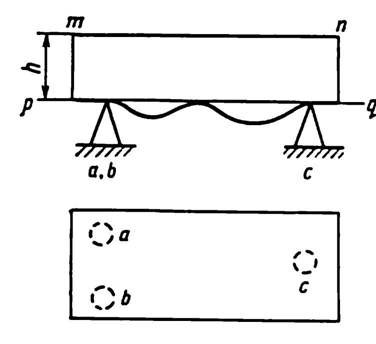


Fig. 36. Mises en place éventuelles suivant une surface susceptible de produire des défauts de planéité

Les surfaces d'appui, notamment celles des pièces brutes et dégrossies, comportent des défauts de forme par rapport à une géométrie correcte ; les pièces doivent être donc abloquées sur des appuis ponctuels ou cales.

Ainsi, lors de la mise en place sur des éléments d'appui plans d'un montage ou d'une table de machine (fig. 36) de plusieurs ébauches dont les plans d'appui comportent d'importants défauts de planéité, il est impossible de communiquer aux ébauches une position stable et bien définie.

On sait qu'un plan est défini par trois points ; la surface de l'ébauche prendra donc contact avec celle du montage ou de la table en trois points quelconques, rendant ainsi sa position instable et indéfinie.



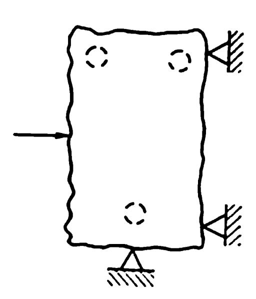




Fig. 37. Mise en place d'une ébauche sur des cales ponctuelles

Fig. 38. Appuis guidant l'ébauche et butée formant appui auxiliaire

La position de l'ébauche est beaucoup plus stable et mieux définie (fig. 37) si elle est placée sur trois appuis ponctuels (bornes). Lors de l'usinage du plan *mn* la cote *h* sera respectée alors à partir du plan *pq* défini par trois appuis ponctuels *a*, *b* et *c*.

Pour améliorer la rigidité de la fixation, on utilise des appuis réglables du type de petits vérins mis en contact avec l'ébauche seulement après son calage sur des appuis fixes et le blocage en cette position.

Deux appuis fixes suffisent pour orienter l'ébauche, c'est-à-dire pour la repérer par rapport à un autre plan, car la direction d'une ligne est définie par deux points; pour supprimer le dernier degré de liberté, il faut disposer d'une butée sous forme d'appui fixe (fig. 38).

Si le positionnement est réalisé suivant des surfaces usinées avec précision, les bornes sont remplacées par des cales pour prévenir la formation des empreintes.

Les bornes et les cales réduisent sensiblement l'action des défauts géométriques des surfaces d'appui sur la précision de la mise en place.

En choisissant les éléments d'appui parmi les surfaces réelles des pièces dont la forme est faussée, le calage des pièces est effectué suivant leurs éléments géométriques. Lors du calage sur trois bornes notamment, la surface d'appui n'est pas une surface réelle, mais un plan géométrique défini par les trois points des appuis; le repérage de l'ébauche suivant la surface latérale est effectué non pas d'après un plan de référence réel, mais d'après une ligne définie par les deux points des butées; l'appui est réalisé non pas par toute la surface, mais par le point de contact de la surface avec la butée; en serrant un arbre par les centres entre les pointes, nous le positionnons suivant l'axe des centres; en posant un pignon par ses entredents sur les rouleaux d'un montage prévu pour la rectification de l'alésage, nous assurons son positionnement d'après la circonférence primitive; en d'autres termes, quel que soit le principe de positionnement, les éléments d'appui réels sont constitués d'éléments géométriques et non de surfaces réelles de l'ébauche, de même que les éléments de référence sont également constitués d'éléments géométriques et non de surfaces réelles.

L'ensemble de surfaces pris comme élément d'appui doit être usiné dès les premières phases de la gamme; l'objet du façonnage est alors d'assurer une précision maximale de la position relative des surfaces d'appui.

Pour exécuter les surfaces d'appui, on est contraint de choisir en guise de surface de référence une surface brute dite *surface de départ*. Cette surface peut rester brute ou subir un usinage ultérieur.

En usinage la surface de départ doit assurer le mieux possible l'enlèvement régulier de la surépaisseur, le positionnement s'effectuant suivant la surface déjà usinée, ainsi que la position relative la plus précise des surfaces usinées et brutes de la pièce.

Les surfaces de départ doivent être nettes au possible, privées de dépouilles de formage et de moulage ; il ne convient pas de les choisir pour y placer des jets de coulées, des masselottes, etc.

Lorsque la configuration de la pièce est telle que l'observation des prescriptions relatives aux surfaces de départ est impossible, on aménage dans les pièces de fonderie des bossages et dans les pièces de forge des masselottes utilisés aux premières phases de la gamme comme surfaces de départ. Les bossages sont soit enlevés lors de l'usinage ultérieur, soit laissés sur la pièce déjà finie.

Ainsi, les considérations principales qui doivent guider avantageusement le choix des surfaces d'appui peuvent être énoncées de la manière suivante.

En premier lieu, il faut s'efforcer au maximum de faire coïncider les surfaces d'appui et de référence, c'est-à-dire choisir pour surface d'appui une surface de référence. En procédant ainsi il faut retenir que les meilleurs résultats quant à la précision s'obtiennent lorsque les surfaces d'appui et de référence sont confondues avec la surface de montage.

On sait que les *surfaces de montage* sont des surfaces qui définissent la position de la pièce par rapport aux autres éléments du produit ; tels sont, par exemple, l'alésage central du pignon et les plans de contact du corps de la poupée avec le banc d'un tour.

Pour choisir les surfaces d'appui, de référence et de montage et pour établir la gamme d'usinage, l'agent de méthodes doit tenir compte du mode d'association de toutes ces surfaces et dans ce but analyser non seulement les dessins d'exécution, mais encore les dessins de montage.

Lors de l'étude de la pièce, l'ingénieur d'étude ne doit pas non plus perdre de vue cette association et doit s'efforcer de rendre les surfaces d'appui, de référence et de montage susceptibles d'être confondues.

Deuxièmement, il convient de se tenir le plus possible au principe de constance d'une surface d'appui, qu'on choisit parmi les mêmes surfaces dans toutes les phases importantes.

Troisièmement, dans le cas où il est impossible de s'en tenir à la même surface d'appui, il faut la choisir parmi des surfaces déjà façonnées, capables d'assurer la rigidité du calage ; si dans ces conditions la surface d'appui ne se confond pas avec celle de référence, il faut vérifier la tolérance de la cote à respecter et, si la nécessité se présente, calculer de nouveau les tolérances sur les cotes des surfaces d'appui, c'est-à-dire les rendre plus rigoureuses.

Quatrièmement, la surface d'appui doit assurer la rigidité du calage, c'est-à-dire une position susceptible de rester invariable pendant l'usinage ; on y parvient en conférant aux surfaces d'appui des dimensions et des positions relatives correspondantes.

Dans l'obtention automatique des cotes, la surface de départ ne peut servir que pour un calage, car si on y revient, on peut compromettre les positions relatives des surfaces usinées. Toutefois pour les ébauches formées par moulage et matriçage de précision, suivis de repoussage-calibrage, cette règle n'est pas de rigueur. Il est admissible également, à titre d'exception, de recourir encore à la surface de départ sur le même montage ou sur un montage de même type à condition d'utiliser la même disposition des éléments de calage, assurant le contact avec les surfaces d'appui aux mêmes points que lors de sa première utilisation et dans les cas où une précision élevée n'est pas de rigueur.

Il arrive que la configuration de la pièce ne permette pas de choisir une surface d'appui susceptible de satisfaire aux prescriptions imposées. On façonne alors des surfaces ne pouvant servir que pour la mise en place considérée et qui ne jouent aucun rôle fonctionnel. Ce sont des surfaces de reprise provisoires.

Parmi ces dernières mentionnons, par exemple, les centres prévus pour l'usinage des arbres, la gorge pratiquée dans la jupe des pistons, les alésages dans les semelles des corps (voir fig. 33).

L'*ablocage de l'ébauche lors de la mise en place* doit permettre de fixer sa position définie par la surface d'appui et de réaliser la rigidité du calage nécessaire pour l'exécution de l'usinage.

L'ablocage de l'ébauche peut provoquer des déformations élastiques qui compromettent la précision.

Un choix judicieux des appuis et des dispositifs de fixation des montages permet dans la plupart des cas de réduire les déformations à des grandeurs si infimes qu'on peut les négliger lors des calculs des défauts d'usinage. Mais il est assez fréquent, surtout lorsqu'il s'agit de pièces peu rigides, que la déformation des ébauches fausse notablement la précision, et surtout celle des formes et des positions relatives des surfaces façonnées.

La réalisation de l'ablocage peut donner lieu à des forces suceptibles de compromettre la position définie par les surfaces d'appui de l'ébauche.

Au droit du contact des surfaces d'appui avec les éléments de la mise en place des montages, la déformation des rugosités et des couches superficielles des ébauches due à l'action des efforts de serrage et des forces de pesanteur entraîne un affaissement.

Le professeur A. Sokolovski a établi la relation empirique suivante entre la déformation de la couche superficielle (affaissement) y et la pression spécifique:

$$y = Cq^m,$$

où C est le coefficient défini par la matière d'œuvre et l'état de surface ;

q, la pression spécifique en kg/mm^2;

m, l'exposant établi expérimentalement.

Si la déformation des couches superficielles était la même pour toutes les ébauches usinées, elle pourrait être compensée par la mise à la cote correspondante de l'outil relativement aux éléments de repérage du montage. Mais la qualité de la surface variant pour les pièces du même lot, et d'autant plus des lots différents, l'application excentrée de la charge, l'allure ondulée de la surface et d'autres défauts, ainsi que la variation des pressions spécifiques font que la valeur de l'affaissement varie d'une pièce à l'autre.

Pour calculer l'erreur cumulée de la mise en place, il convient de tenir compte du déplacement de l'ébauche lors du serrage. Supposons que le réglage de la machine pour l'usinage d'un lot de pièces prévoit la mise de l'outil à la cote H', avec une déformation minimale de la couche superficielle, c'est-à-dire avec un affaissement minimal (fig. 39).

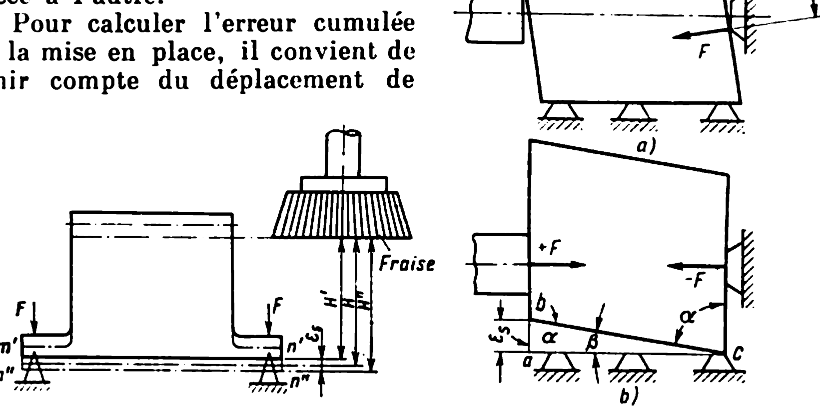


Fig. 39. Abaissement d'une ébauche lors de sa fixation par une force F perpendiculaire à la surface d'appui

Fig. 40. Pivotement d'une ébauche lors de sa fixation dû à une force F parallèle à la surface d'appui :
a — position initiale de l'ébauche ; *b* — position terminale

La cote nominale H se modifie de H' à H'', car, pour la même position de l'outil, la surface de référence se déplace de $m'n'$ en $m''n''$; le déplacement de la surface de référence entraîne le changement de la cote à respecter H de la valeur du *défaut de serrage* $\varepsilon_s = H'' - H'$, définie par la différence des distances limites entre la surface de référence et l'outil mis à la cote.

L'affaissement des ébauches résultant de la déformation des couches superficielles se produit lorsque l'effort de serrage F est perpendiculaire à la surface d'appui.

Le défaut de serrage qui est fonction de la déformation des couches superficielles n'est pas grand et ne dépasse pas 200 μ pour les cotes

inférieures à 500 mm. D'autre part, il ne joue que pour la première mise en place suivant la surface d'appui considérée; l'application réitérée de la charge ne produit qu'une compression supplémentaire infime des rugosités, dont on ne tient pas compte généralement.

Si la direction de l'effort de serrage est parallèle à la surface d'appui, dans certaines conditions le serrage de l'ébauche peut provoquer son pivotement. Le refoulement des ébauches dû à des dépouilles de formage et de fonderie courantes est peu probable.

Lorsque la surface d'appui de l'ébauche forme avec la surface latérale un angle α (fig. 40), l'effort de serrage F, normal à la surface latérale, produit un couple $M = Fl$; ce couple fait pivoter la pièce d'un angle $\beta = (90° - \alpha)$, après quoi l'équilibre statique s'établit. On obtient en considérant le triangle abc

$$ab = bc \cos \alpha$$

ou

$$\varepsilon_s = B \cos \alpha, \qquad (9)$$

où ε_s est le défaut de serrage résultant du pivotement de l'ébauche;

B, la cote de la surface d'appui dans le sens de l'effort de serrage;

α, l'angle formé par la surface d'appui et la surface latérale (écart de position relative des surfaces de l'ébauche).

Pour les surfaces brutes on peut adopter l'angle de pivotement $\beta = 1°$, pour les surfaces dégrossies $\beta = 0°40'$, pour les surfaces finies $\beta = 0°20'$ et pour les surfaces rectifiées $\beta = 0°04'$.

Pour parer au pivotement des pièces lors de leur mise en place sur les montages d'usinage où l'effort de serrage est parallèle à la surface d'appui, les organes de serrage du type étau sont étudiés de manière que l'effort serre la surface d'appui contre les éléments de calage.

Les déplacements axiaux des ébauches serrées sur une pince, un mandrin simple ou extensible sont également fonction de la rugosité et des aspérités macroscopiques de la surface, de l'état de la couche superficielle et de la rigidité des organes de serrage.

Les déplacements radiaux des pièces fixées sur des mandrins extensibles et des pinces sont définis par le déplacement de l'axe de l'ébauche par rapport à l'axe de rotation et sont fonction surtout de défauts de forme géométrique de la surface serrée et de la rigidité des accessoires de serrage. Ces défauts de la mise en place, de même que ceux du positionnement, n'augmentent pas directement les écarts du diamètre à respecter, mais provoquent des écarts de positions relatives des surfaces élémentaires des ébauches et des pièces finies.

Pour le moment, nous ne pouvons pas considérer que l'étude des déformations des couches superficielles et des défauts de serrage des pièces est terminée et recommander une méthode assez sûre de calcul

de leurs valeurs. Aussi sommes-nous obligés de faire appel à des données empiriques qui sont des grandeurs moyennes des défauts de serrage [1].

Ainsi, le défaut de serrage résulte de l'action des efforts de serrage qui provoquent le déplacement de l'ébauche par rapport aux éléments de calage du montage ; de même que le défaut de positionnement, il est défini par la différence des distances limites entre la surface de référence et l'outil mis à la cote.

Le *défaut de mise en place* des pièces lors de l'usinage sur des machines-outils, que nous désignerons par ε_m, est défini par la valeur totale du défaut de positionnement ε_p et du défaut de serrage ε_s. Dans l'usinage des ébauches planes et des bouts des corps de révolution, les défauts de positionnement et de serrage sont des vecteurs colinéaires qui se situent sur la même droite et qui s'ajoutent arithmétiquement :

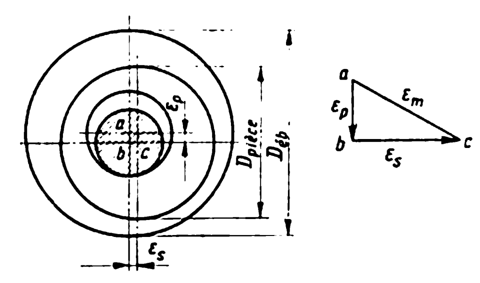


Fig. 41. Mise en place avec positionnement suivant un trou cylindrique sur un mandrin rigide lors d'un ajustement libre et avec la fixation du mandrin sur un mandrin à serrage concentrique

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p + \varepsilon_s. \qquad (10)$$

Lors de l'usinage des surfaces de révolution, les vecteurs des défauts de positionnement et de serrage peuvent former un angle quelconque. Dans ces cas, l'erreur de mise en place est définie géométriquement comme la somme géométrique des défauts de positionnement et de serrage ; dans ces conditions, la grandeur la plus probable du défaut de mise en place est

$$\varepsilon_m = \sqrt{\varepsilon_p^2 + \varepsilon_s^2}. \qquad (11)$$

La figure 41 représente à titre d'exemple l'exécution d'une mise en place avec positionnement sur un mandrin rigide et ajustement libre ; ici, le défaut de positionnement est ε_p, alors que le défaut de serrage sur un mandrin à serrage concentrique est ε_s. Le défaut de mise en place est calculé dans ce cas suivant la formule (11).

Les cas sont assez fréquents où la cotation fonctionnelle portée sur les dessins ne correspond pas aux liaisons géométriques définies par la structure de la gamme d'usinage adoptée, et rend malaisée la vérification des ébauches usinées. Des considérations technolo-

[1] Voir Annexe 1.

giques obligent parfois à changer les surfaces de référence choisies par l'agent d'étude. Dans ces cas, de même que lors du changement en service des surfaces d'appui, il faut reviser le dimensionnement en partant de l'analyse géométrique des liaisons entre les cotes fonctionnelles et les surfaces d'appui adoptées.

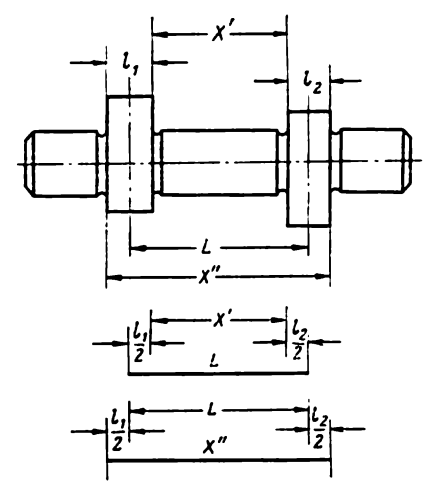


Fig. 42. Illustration du calcul des tolérances sur les cotes de fabrication

Examinons à titre d'exemple le dessin de l'arbre à cames (fig. 42). Les conditions d'exploitation exigent que les cotes l_1, l_2 et L soient respectées et que la cote L soit tolérancée rigoureusement. Tant que l'usinage n'est pas fini, il est impossible de vérifier directement la cote L. Les mesures directes peuvent être effectuées soit suivant la cote x', soit suivant la cote x''. En établissant une de ces cotes, l'agent de méthodes doit désigner une tolérance qui permet l'exécution de la cote L avec la tolérance prévue par l'agent d'étude.

Cette condition définit la méthode suivante de résolution du problème.

1. Si l'agent de méthodes a décidé de remplacer la cote L par x', alors

$$\delta_L = L_{max} - L_{min};$$

$$L_{max} = \frac{l_{1max}}{2} + x'_{max} + \frac{l_{2max}}{2};$$

$$L_{min} = \frac{l_{1min}}{2} + x'_{min} + \frac{l_{2min}}{2};$$

$$\delta_L = \frac{\delta_{l_1}}{2} + \delta_{x'} + \frac{\delta_{l_2}}{2}$$

ou

$$\delta_L = \delta_{x'} + \frac{\delta_{l_1} + \delta_{l_2}}{2},$$

et

$$\delta_{x'} = \delta_L - \frac{\delta_{l_1} + \delta_{l_2}}{2}.$$

2. Si la cote L est remplacée par la cote x'' on a

$$L_{max} = x''_{max} - \frac{l_{1min}}{2} - \frac{l_{2min}}{2} ;$$

$$L_{min} = x''_{min} - \frac{l_{1max}}{2} - \frac{l_{2max}}{2} ;$$

$$\delta_L = \delta_{x''} + \frac{\delta_{l_1}}{2} + \frac{\delta_{l_2}}{2} = \delta_{x''} + \frac{\delta_{l_1} + \delta_{l_2}}{2} ,$$

d'où il vient

$$\delta_{x''} = \delta_L - \frac{\delta_{l_1} + \delta_{l_2}}{2} ,$$

c'est-à-dire le même résultat que dans le premier cas.

Ainsi, en partant de la formule principale des séries de dimensions, la formule générale peut s'écrire

$$\delta_L = \sum_{i=1}^{m-1} \delta_i$$

ou

$$\delta_L = \delta_x + \sum_{i=1}^{m-2} \delta_i ,$$

donc

$$\delta_x = \delta_L - \sum_{i=1}^{m-2} \delta_i \ldots , \qquad (12)$$

où δ_x est la tolérance sur la cote recherchée;
δ_L, la tolérance sur la cote à remplacer;
δ_i, les tolérances sur les cotes des autres termes de la série;
m, le nombre total de tous les termes de la série de dimensions, y compris les cotes recherchées et à remplacer.

Lors de l'exécution des cotes par le procédé d'obtention individuelle, une ébauche est mise en place avec dégauchissage par rapport aux organes d'exécution de la machine, alors que les outils sont mis à la cote pour chaque ébauche prise séparément à l'aide de passes d'essai et de mesures.

Il convient de noter que, dans plusieurs cas, la mise en place est effectuée sans dégauchissage. Il en est ainsi, notamment, lors du montage d'une ébauche centrée entre les pointes d'un tour, car dans ce cas le dégauchissage ne peut pas changer la position de l'ébauche; le dégauchissage suivant la hauteur est également à exclure lorsque les ébauches sont placées sur la table d'une fraiseuse par une surface déjà usinée. Le dégauchissage est réalisé soit directement suivant la surface à usiner, soit suivant les lignes de traçage.

La figure 43 illustre le dégauchissage d'une ébauche suivant une surface brute à l'aide d'un trusquin. Le dégauchissage d'une pièce de support suivant les traits de traçage (fig. 44) est effectué à partir de la table de la machine à l'aide d'un trusquin qui permet de rendre la surface à usiner parallèle à la surface de la table. Parfois

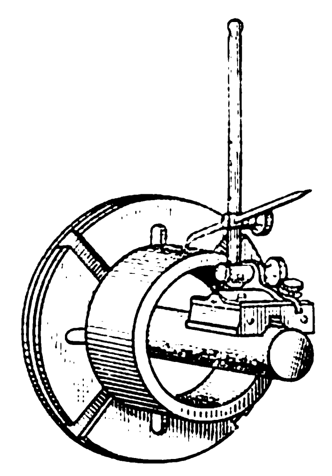


Fig. 43. Dégauchissage d'une ébauche suivant une surface de révolution brute à l'aide d'un trusquin

Fig. 44. Dégauchissage d'une ébauche sur la table de la machine suivant les traits de traçage

on utilise une règle et un niveau pour donner à la surface une position horizontale ; pour dégauchir de grosses pièces on recourt aux procédés optiques.

Dans le procédé d'obtention individuelle des cotes, les pièces sont soumises généralement au traçage préalable, c'est-à-dire à l'exécution sur l'ébauche des traits qui délimitent les surfaces à exécuter. Pour réaliser le traçage, il faut d'abord porter sur la pièce les axes de symétrie, puis les traits d'axe principaux ainsi que quelques traits témoins et auxiliaires. Lors du traçage il importe de choisir judicieusement les surfaces de départ, car elles régissent la position des traits portés par le traçage. A cet effet, on peut mettre à profit les considérations sur le positionnement des ébauches pour l'usinage sur des machines-outils.

Nombreux sont les cas où le traçage doit être repris. Il en est ainsi, notamment, après l'usinage des surfaces de référence, lorsqu'il faut situer les surfaces qui leur sont associées, ou avant de s'attaquer à la finition, lorsqu'il faut corriger les pièces voilées par vieillissement, etc. La précision du traçage définit pour beaucoup celle des

cotes à respecter. Il arrive assez souvent qu'un traçage correct permette de corriger par un balancement correspondant des cotes une ébauche défectueuse qu'il aurait fallu mettre au rebut.

Dans le travail à l'unité, le but du traçage est de
a) vérifier l'aptitude des ébauches à l'usinage;
b) assurer le dégauchissement de l'ébauche lors de sa mise en place sur la machine;
c) indiquer les surfaces qui délimitent l'usinage;
d) exécuter les traits nécessaires pour la pose des plaques de perçage;
e) contrôler les pièces complexes finies.

Dans le travail en série le traçage a pour but de
a) vérifier l'usinabilité des pièces mécaniques complexes;
b) régler les montages prévus pour le façonnage du lot considéré de pièces de fonderie;
c) exécuter les traits pour la mise en place des ébauches sur les montages simples et pour définir la position des plaques de perçage;
d) assurer le dégauchissage de grosses pièces de fonderie pour éliminer les montages lourds et complexes.

Dans le travail en grande série et en masse, le traçage n'est pas justifié, car il est alors beaucoup plus avantageux de mettre en œuvre des montages spéciaux qui assurent automatiquement le dégauchissage des ébauches sur les machines-outils.

Le dégauchissage de l'ébauche suivant les traits de traçage s'effectue généralement au trusquin; lorsque ce dernier est déplacé sur une table ou sur un marbre, son aiguille ne doit pas s'écarter du trait et doit passer par le centre des empreintes du pointeau (voir fig. 44).

Le dégauchissage peut se faire également suivant les surfaces façonnées lors des opérations précédentes; dans ce cas l'aiguille du trusquin est guidée soit par les demi-empreintes du pointeau restées après l'usinage, soit directement par la surface usinée.

Pour rendre plus précis le dégauchissage par la surface usinée, le trusquin ordinaire est remplacé par un trusquin à règle graduée.

Quel que soit le cas, la position requise de l'ébauche à dégauchir est obtenue à l'aide de cales, de coins simples ou doubles, de vérins et d'autres accessoires de calage universels.

Le dégauchissage peut être effectué également après l'ablocage, car l'effort de serrage peut compromettre la position de l'ébauche.

La précision du dégauchissage n'étant pas absolue, il faut tenir compte des erreurs de dégauchissage qui influent sur la précision d'usinage à partir de la mise en place considérée [1].

---

[1] Pour les valeurs des erreurs de mise en place suivie de dégauchissage voir Annexe 2.

Le traçage et la mise en place avec dégauchissage sont des opérations délicates qui doivent être exécutées par des opérateurs très qualifiés. Dans le cas du procédé d'obtention automatique des cotes on utilise des montages d'usinage et des machines réglées à l'avance ; la mise en position des ébauches sans dégauchissage réduit alors nettement le temps de mise en place et les opérateurs ne sont pas astreints à posséder des aptitudes professionnelles élevées. Ce sont là des avantages importants de la mise en place des ébauches sur des montages. Toutefois les montages spéciaux ne sont justifiés que lorsque le programme est plus ou moins important, alors que dans les conditions d'un travail à l'unité, le traçage et la mise en place suivie de dégauchissage sont les seuls valables du point de vue économique.

§ 3. Calcul des tolérances de fabrication dans le procédé d'obtention automatique des cotes

Notion de rigidité du système technologique machine-pièce-outil. Calcul de la rigidité d'un système technologique. Calcul de la flexibilité et des refoulements d'un système technologique. Calcul de la valeur minimale et maximale de la composante de l'effort de coupe normale à la surface à usiner. Dispersion des cotes à respecter résultant des variations de l'effort de coupe et des refoulements des éléments du système technologique.

Reproduction des erreurs et diminution progressive de celles-ci lors de l'usinage sur des machines-outils. Erreurs constantes dans le lot de pièces à usiner. Précision de la forme des ébauches à usiner en fonction des défauts géométriques des machines-outils. Action de l'erreur de réglage de la machine sur la cote à respecter. Erreurs dont la valeur change progressivement à mesure que l'usinage d'un lot de pièces avance. Usure dimensionnelle de l'outil. Ecarts de la cote à respecter résultant des déformations thermiques des éléments du système technologique.

Calcul de l'erreur d'usinage cumulée.

Considérations sur les moyennes des tolérances de fabrication obtenues par calcul. Tolérances des cotes des pièces brutes. Défauts de position des éléments associés des ébauches et des pièces mécaniques.

A. Calculs de la rigidité, de la flexibilité et des refoulements d'un système technologique machine-pièce-outil

Lors du façonnage des ébauches, la machine-outil, le montage d'usinage, la pièce elle-même, l'outil et le porte-outil (mandrins, pinces, barres d'alésage, etc.) forment un système élastique que nous désignerons sommairement par le terme de système élastique machine-pièce-outil.

La variation en service des conditions d'usinage fait varier également l'effort de coupe. Ce dernier se modifie notamment sous l'effet de la variation des cotes des ébauches qui conduit à une profondeur

de coupe irrégulière, des propriétés mécaniques de la matière, de l'émoussage de l'arête tranchante dont la géométrie se trouve ainsi faussée par l'usure en cours d'usinage, etc.

Le système élastique machine-pièce-outil est sollicité en usinage par l'effort de coupe qui produit des déformations élastiques, ainsi que par les déplacements des éléments du système résultant des jeux dans les articulations. La grandeur des déformations élastiques et des refoulements est définie, d'une part, par l'effort de coupe et, de l'autre, par la rigidité du système élastique, c'est-à-dire par son aptitude à résister à l'effort appliqué. La variabilité de l'effort de coupe produit des déformations et des refoulements irréguliers des éléments du système élastique ; il en résulte des défauts de forme de la surface usinée et, donc, la dispersion des cotes à observer. La précision d'usinage est définie ainsi par la rigidité du système élastique machine-pièce-outil.

On sait que la rigidité est le quotient de la force appliquée par la valeur de la déformation produite par cette force.

Les variations de l'effort de coupe les plus importantes pour la précision d'usinage sont celles de sa composante normale à la surface usinée.

Sous le terme de rigidité d'un système élastique machine-pièce-outil on comprend la relation entre cette composante de l'effort de coupe et le décalage de l'outil mis à la cote dans le sens de la normale à la surface usinée. Ainsi, la rigidité du système (j) est égale à :

$$j = \frac{F_y}{Y} \text{ kg/mm}, \tag{13}$$

où F_y est la composante de l'effort de coupe normale à la surface usinée, en kg ;

Y, le refoulement des éléments du système produit par la force F_y, en mm.

La rigidité peut être exprimée également par la relation entre l'accroissement de l'effort de coupe ΔF_y et l'accroissement du refoulement ΔY :

$$j = \frac{\Delta F_y}{\Delta Y}.$$

Les éléments de la machine ne font pas que se déformer, ils changent également leur position relative par suite de l'existence des jeux et de l'élasticité des joints ; aussi, la rigidité des ensembles n'est-elle pas calculée, mais établie expérimentalement.

D'après des travaux de recherche, la rigidité des ensembles diffère suivant que le système subit l'action simultanée des composantes F_y et F_z ou seulement celle de la composante radiale F_y. Dans de nombreux cas, la rigidité est influencée également par la compo-

sante F_x. C'est pourquoi les renseignements obtenus sont plus précis lorsque la rigidité ou la flexibilité sont établies en usinage lorsque les mesures totalisent l'action des trois composantes de l'effort de coupe.

Les expériences du professeur A. Sokolovski ont révélé que l'action simultanée des composantes F_y et F_z augmente nettement la rigidité du chariot d'un tour par rapport à l'effet produit par la seule composante radiale F_y. La composante F_z peut exercer une toute autre action sur la rigidité de la poupée et de la contre-poupée. Lorsque celles-ci sont chargées, F_z diminue généralement la rigidité.

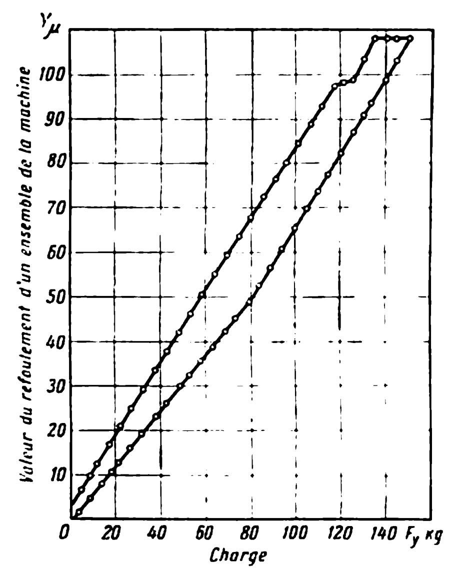


Fig. 45. Branches des charges et des décharges de la caractéristique des refoulements d'un ensemble (contre-poupée) d'un tour

Le refoulement des ensembles d'une machine-outil est déterminé en plus par la charge; les refoulements dépendent notamment du moment de rotation transmis par la broche; il en résulte une flèche de la broche, le déplacement de l'ébauche par rapport à la pointe et le déplacement de la pointe dans le logement de la broche dû à l'entraînement unilatéral par le toc.

Pour déterminer la rigidité d'un ensemble on lui applique des charges dont la valeur varie depuis zéro jusqu'à une grandeur maximale, fonction des dimensions de la machine-outil; le refoulement est mesuré pour chaque charge dans le sens de la normale à la surface usinée. La charge est ensuite supprimée pour mesurer les déformations résiduelles; les opérations successives de charge et de décharge permettent de dresser le diagramme des relations

$$Y = f(F_y);$$

généralement les branches des charges et des décharges de la caractéristique de la rigidité ne coïncident pas et donnent lieu en un cycle à un hystérésis (fig. 45) résultant de la dispersion de l'énergie; les données ainsi obtenues permettent de définir la rigidité de l'ensemble.

La rigidité de la machine est établie par calcul en partant des données expérimentales de la rigidité de ses ensembles. Celle d'un

tour, lors de l'usinage d'un arbre entre pointes, s'obtient sur la base des considérations suivantes.

L'action de la composante F_y de l'effort de coupe, appliqué à un point quelconque de la portée (fig. 46), déplace la poupée de A en A' à la grandeur de refoulement Y_p, la contre-poupée, de B

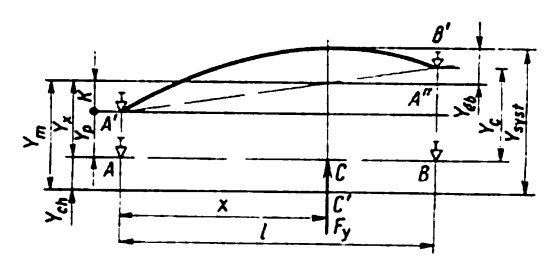


Fig. 46. Illustration du calcul des refoulements d'un système élastique machine-pièce

en B' à la grandeur Y_c, le chariot, de C en C' à la grandeur Y_{ch}, et l'axe de rotation de l'ébauche, de AB en $A'B'$. Dans la section x, l'axe se déplace à la grandeur Y_x; alors

$$Y_x = Y_p + K; \quad Y_p = \frac{F_A}{j_p}; \quad Y_c = \frac{F_B}{j_c};$$

$$F_A = F_y \frac{l-x}{l}; \quad F_B = F_y \frac{x}{l},$$

où F_A et F_B sont les pressions exercées sur la poupée et la contre-poupée par la composante F_y de l'effort de coupe.

En remplaçant F_A et F_B par leur valeur on obtient

$$Y_p = \frac{F_y}{j_p} \cdot \frac{l-x}{l}; \quad Y_c = \frac{F_y}{j_c} \cdot \frac{x}{l}.$$

La valeur de K est déterminée à partir du triangle $A'B'A''$:

$$\frac{K}{Y_c - Y_p} = \frac{x}{l},$$

d'où

$$K = (Y_c - Y_p) \cdot \frac{x}{l},$$

donc

$$Y_x = Y_p + (Y_c - Y_p) \cdot \frac{x}{l}.$$

Après des substitutions et des transformations correspondantes, il vient

$$Y_x = \frac{F_y}{j_p} \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 + \frac{F_y}{j_c} \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2.$$

En désignant par Y_m le refoulement total des ensembles de la machine, quelle que soit la position de l'outil le long de l'axe de l'ébauche, on obtient d'après la fig. 46

$$Y_m = Y_{ch} + Y_x,$$

où

$$Y_{ch} = \frac{F_y}{j_{ch}}.$$

En substituant aux Y_{ch} et Y_x leur valeur, il vient

$$Y_m = \frac{F_y}{j_{ch}} + \frac{F_y}{j_p} \cdot \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 + \frac{F_y}{j_c} \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2$$

ou

$$Y_m = F_y \left[\frac{1}{j_{ch}} + \frac{1}{j_p} \cdot \left(\frac{l-x}{l}\right)^2 + \frac{1}{j_c} \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2\right]. \tag{14}$$

Dans ces conditions la rigidité de la machine j_m est donnée par l'expression suivante :

$$j_m = \frac{F_y}{Y_m} = \frac{1}{\frac{1}{j_{ch}} + \frac{1}{j_p}\left(\frac{l-x}{l}\right)^2 + \frac{1}{j_c} \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2}. \tag{15}$$

Les difficultés du calcul rendent très malaisée l'application de la formule (15) à l'établissement de la rigidité de la machine. Pour le confirmer, voici un exemple. Soit, $j_{ch} = 2780$ kg/mm, $j_p = 3850$ kg/mm et $j_c = 2940$ kg/mm ; alors, lorsque l'outil se trouve notamment au point $x = 0{,}7\ l$, la formule (15) donne

$$j_m = \frac{1}{\frac{1}{2780} + \frac{1}{3850} \cdot \left(\frac{l-0{,}7l}{l}\right)^2 + \frac{1}{2940} \cdot \left(\frac{0{,}7l}{l}\right)^2} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{2780} + \frac{0{,}09}{3850} + \frac{0{,}49}{2940}} = \frac{1}{0{,}00036 + 0{,}000023 + 0{,}000167} =$$

$$= \frac{1}{0{,}00055} = 1818 \text{ kg/mm}.$$

Dans les calculs d'analyse des travaux il est plus aisé de faire appel à la *flexibilité* (*W*) qui est une valeur inverse de la rigidité :

$$W = \frac{1}{j} \text{ mm/kg}$$

ou

$$W = \frac{1000}{j} \ \mu\text{/kg}. \tag{16}$$

Mais même en calculant la flexibilité d'après la rigidité on ne parvient presque pas à simplifier le calcul :

$$\frac{1}{j_m}=\frac{1}{j_{ch}}+\frac{1}{j_p}\cdot\left(\frac{l-x}{l}\right)^2+\frac{1}{j_c}\cdot\left(\frac{x}{l}\right)^2. \qquad (17)$$

On s'aperçoit aisément que cette formule ne simplifie pas non plus le calcul de la rigidité. Dans notre exemple

$$\frac{1}{j_m}=0{,}00055 \text{ mm/kg},$$

d'où

$$j_m=\frac{1}{0{,}00055}=1818 \text{ kg/mm}.$$

Si on remplace la rigidité par la flexibilité, la formule (17) s'écrit

$$W_m=W_{ch}+W_p\cdot\left(\frac{l-x}{l}\right)^2+W_c\left(\frac{x}{l}\right)^2, \qquad (18)$$

ce qui simplifie nettement les calculs.

Pour le cas considéré, on obtient

$$W_{ch}=\frac{1000}{2780}=0{,}36 \ \mu/\text{kg};$$

$$W_p=\frac{1000}{3850}=0{,}26 \ \mu/\text{kg};$$

$$W_c=\frac{1000}{2940}=0{,}34 \ \mu/\text{kg};$$

$$W_m=0{,}36+0{,}26\cdot 0{,}09+0{,}34\cdot 0{,}49=0{,}55 \ \mu/\text{kg}.$$

Pour calculer la flexibilité il n'est pas nécessaire de refaire les calculs en partant de la rigidité établie au préalable. La flexibilité des ensembles d'une machine peut être immédiatement obtenue par voie expérimentale. Dans ce but on construit le même graphique (fig. 45) :

$$Y=f(F_y).$$

La flexibilité est déterminée par la formule

$$W=\frac{Y}{F_y}. \qquad (19)$$

La formule (19) donne

$$Y=F_yW. \qquad (20)$$

En calculant le refoulement des ensembles d'une machine sur la base de sa flexibilité totale, on obtient

$$Y_m=F_yW_m;$$

une fois la grandeur W portée dans la formule (18), il vient

$$Y_m = F_y \left[W_{ch} + W_p \cdot \left(\frac{l-x}{l} \right)^2 + W_c \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 \right]. \qquad (21)$$

La précision des dimensions diamétrales d'un arbre lisse monté entre pointes est fonction de sa flexion produite par l'action des efforts de coupe.

Quelle que soit la position de l'outil le long de l'axe de l'ébauche (voir fig. 47), la flèche d'une ébauche usinée ($Y_{éb}$) est définie par la formule connue de la résistance des matériaux:

$$Y_{éb} = \frac{F_y}{3EJ} \cdot \frac{(l-x)^2 \cdot x^2}{l}$$

La flexibilité de l'ébauche est

$$W_{éb} = \frac{Y_{éb}}{F_y} = \frac{1}{3EJ} \cdot \frac{(l-x)^2 \, x^2}{l};$$

dans ces formules:

E est le module d'élasticité, en kg/mm^2;

J, le moment d'inertie, en mm^4; pour une section circulaire pleine

$$J = \frac{\pi d^4}{64};$$

l et d, la longueur et le diamètre de l'ébauche, en mm.

La flexibilité des ensembles d'une machine étant exprimée en μ/kg, la flèche d'une ébauche doit être exprimée en μ et sa flexibilité en μ/kg; donc

$$Y_{éb} = \frac{1000 F_y}{3EJ} \cdot \frac{(l-x)^2 \, x^2}{l} \qquad (22)$$

et

$$W_{éb} = \frac{1000}{3EJ} \cdot \frac{(l-x)^2 \, x^2}{l}. \qquad (23)$$

Pour le montage en l'air d'un arbre lisse, la flèche s'écrit

$$Y_{éb} = \frac{1000 F_y l^3}{3EJ}; \qquad (24)$$

après les transformations correspondantes on obtient pour un arbre lisse en acier

$$Y_{éb} \approx \frac{F_y}{3d} \cdot \left(\frac{l}{d} \right)^3, \qquad (25)$$

où F_y est la composante de l'effort de coupe normale à la surface usinée, en kg;

l et d, la longueur et le diamètre de l'arbre, en mm.

La flexibilité de l'ébauche d'un arbre est donnée par la formule :

$$W_{éb} \approx \frac{1}{3d} \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^3 \mu/\text{kg}. \quad (26)$$

Si l'ébauche est montée en l'air, la flexibilité de la machine se présente comme la somme de la flexibilité du chariot et de celle de la poupée portant une pince ou un mandrin ; cette dernière est calculée pour le cas du serrage sur un mandrin très rigide supportant des charges appliquées à des distances différentes du bout avant de la broche.

En tournage extérieur la flèche de l'outil provoque le déplacement du nez de l'outil dans le sens de la tangente à la surface usinée ; son action sur l'erreur d'usinage est peu importante par rapport à celle due aux refoulements de la machine et à la flèche de l'ébauche. C'est pourquoi dans ces conditions, en calculant la flexibilité et les refoulements du système élastique machine-pièce-outil, on peut négliger la déformation de l'outil et se borner à établir les paramètres correspondants du système machine-pièce.

Lorsqu'il s'agit d'un alésage, c'est l'inverse ; les déformations de l'outil monté en l'air et des barres d'alésage influent nettement sur l'erreur d'usinage, et des cas sont nombreux où l'on peut négliger la flexibilité de l'ébauche pour ne définir que celle du système machine-outil de coupe.

Ainsi, dans le cas considéré (tournage d'un arbre entre pointes)

$$Y_{syst} = Y_m + Y_{éb};$$
$$W_{syst} = W_m + W_{éb}.$$

Les formules (21) et (22) montrent que le refoulement de la machine et la flèche de l'ébauche changent à mesure que l'outil se déplace le long de l'axe de la pièce usinée et que leurs maxima et minima correspondent à des positions définies de l'outil.

Il faut donc établir les points où le refoulement total Y_{syst} atteint le maximum et le minimum, c'est-à-dire l'emplacement des sections suivant la longueur de l'ébauche au niveau desquelles les écarts des cotes sont portés au maximum.

Trouvons les points dans le sens de la longueur de l'ébauche où les refoulements sont maxima et minima en considérant que la rigidité de la machine est parfaite.

On sait que l'ébauche enregistre une flèche maximale lorsque l'outil se trouve au milieu de la portée ; en effet, en calculant la dérivée

$$Y_{éb} = \frac{1000 F_y}{3EJ} \cdot \frac{(l-x)^2 x^2}{l},$$

on a

$$\frac{dY_{éb}}{dx}=\frac{1000F_y}{3EJl}\,[(l-x)^2\,2x+x^2\cdot 2\,(l-x)\,(-1)]=0\,;$$

après transformation, il vient

$$\frac{dY_{éb}}{dx}=\frac{2\cdot 1000F_y}{3EJl}\,(2x^3-3x^2l+xl^2)=0.$$

Le premier terme ne pouvant pas être nul,

$$x\,(2x^2-3xl+l^2)=0$$

ou

$$2x^2-3xl+l^2=0\,;$$

la substitution $2=a$; $-3l=b$; $l^2=c$ permet de réduire cette équation du second degré à la formule

$$ax^2+bx+c=0,$$

et l'on tire

$$x=\frac{-b\pm\sqrt{b^2-4ac}}{2a}=\frac{-(-3l)\pm\sqrt{(-3l)^2-4\cdot 2l^2}}{2\cdot 2}\,;$$

$$x=\frac{3l\pm\sqrt{9l^2-8l^2}}{4}=\frac{3l\pm\sqrt{l^2}}{4}=\frac{3l\pm l}{4}\,;$$

$$x_1=\frac{4l}{4}=l\,;\quad x_2=\frac{2l}{4}=\frac{1}{2}\,l. \tag{27}$$

Trouvons le signe de la seconde dérivée

$$\frac{d^2Y_{éb}}{dx^2}=\frac{2\cdot 1000F_y}{3EJl}\,(2\cdot 3x^2-3l\cdot 2x+l^2)$$

si $x=l$:

$$\frac{d^2Y_{éb}}{dx^2}=\frac{2\cdot 1000\cdot F_y}{3EJl}\,(6l^2-6l^2+l^2)=\frac{2\cdot 1000\cdot F_y}{3EJ}\,l,$$

c'est-à-dire que pour $x=l$, ainsi que pour $x=0$, la valeur de la seconde dérivée est positive (signe « plus ») ; donc pour $x=l$ et $x=0$, la flèche de l'ébauche est minimale ($Y_{éb}=0$) ;

$$\text{si } x=\frac{1}{2}\,l$$

$$\frac{d^2Y_{éb}}{dx^2}=\frac{2\cdot 1000\cdot F_y}{3EJl}\left(6\,\frac{l^2}{4}-6\,\frac{l^2}{2}+l^2\right)=\frac{2\cdot 1000\cdot F_y}{3EJl}\left(\frac{3l^2-6l^2+2l^2}{2}\right)$$

ou

$$\frac{d^2Y_{éb}}{dx^2}=\frac{2\cdot 1000\cdot F_y}{3EJl}\left(-\frac{l^2}{2}\right)=-\frac{1000\cdot F_y}{3EJ}\,l,$$

c'est-à-dire pour $x=\frac{1}{2}l$ la valeur de la seconde dérivée est négative (signe « moins ») ; donc pour $x=\frac{1}{2}l$, la flèche de l'ébauche est maximale. Ainsi,

$$Y_{éb_{\max}}=\frac{1000F_y}{3EJ}\cdot\frac{(l-x)^2x^2}{l}=\frac{1000F_y}{3EJl}\cdot\frac{l^2}{4}\cdot\frac{l^2}{4}=\frac{1000\cdot F_y l^3}{48EJ}.$$

La flèche de l'ébauche croît de zéro près de la poupée au maximum pour $x = 0,5l$, puis décroît symétriquement du maximum pour devenir nulle près de la contre-poupée (fig. 47).

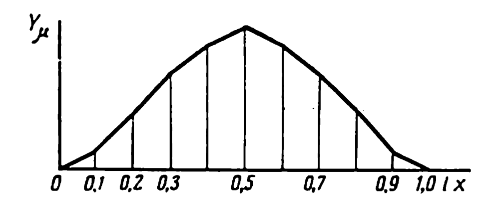


Fig. 47. Courbe de la flèche de l'ébauche d'un arbre lisse façonnée entre les pointes d'un tour

Pour trouver la position de l'outil qui correspond à la valeur maximale ou minimale du refoulement total des ensembles de la machine, la rigidité de l'ébauche étant parfaite, calculons la fonction dérivée:

$$Y_m=F_y\left[W_{ch}+W_p\left(\frac{l-x}{l}\right)^2+W_c\left(\frac{x}{l}\right)^2\right]$$

$$\frac{dY_m}{dx}=F_y\left(W_p\,\frac{2(l-x)(-1)}{l^2}+W_c\,\frac{2x}{l^2}\right)=\frac{2F_y}{l^2}\,(W_p\cdot(x-l)+W_cx)=0.$$

En posant le deuxième terme égal à zéro, il vient

$$W_px-W_pl+W_cx=0,$$

d'où

$$x_m=\frac{W_p}{W_p+W_c}\,l. \qquad (28)$$

La seconde dérivée de cette fonction

$$\frac{d^2Y_m}{dx^2}=\frac{2F_y}{l^2}\,(W_p+W_c)$$

est positive ; donc pour la valeur obtenue de x_m, le refoulement total des ensembles de la machine atteint le minimum.

Le maximum de refoulement total sera enregistré près de la poupée dont la flexibilité est maximum (fig. 48).

Calculons, compte tenu de la flexibilité des ensembles et de la flèche de l'ébauche, les positions de l'outil auxquelles correspondent les refoulements totaux maxima et minima.

Prenons les valeurs de Y_m de la formule (21) et de $Y_{éb}$ de la formule (22); on tire alors

$$Y_{syst}=F_y\left[W_{ch}+W_p\left(\frac{l-x}{l}\right)^2+W_c\left(\frac{x}{l}\right)^2+\frac{1000}{3EJ}\cdot\frac{(l-x)^2x^2}{l}\right]. \quad (29)$$

Pour déterminer la position de l'outil, qui correspond au refoulement

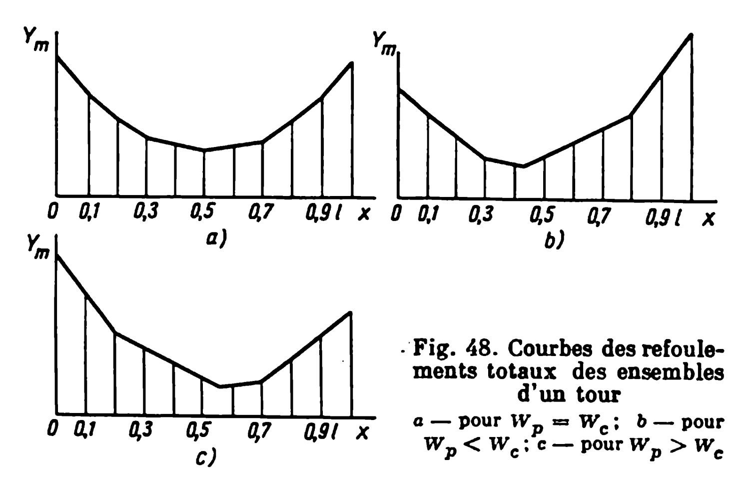


Fig. 48. Courbes des refoulements totaux des ensembles d'un tour

a — pour $W_p = W_c$; *b* — pour $W_p < W_c$; *c* — pour $W_p > W_c$

maximal ou minimal du système élastique machine-pièce, calculons la dérivée de cette fonction :

$$\frac{dY_{syst}}{dx}=F_y\left[W_p\frac{2(l-x)(-1)}{l^2}+W_c\frac{2x}{l^2}+\right.$$
$$\left.+\frac{1000}{3EJ}\cdot\frac{2x(l-x)^2+2x^2(l+x)(-1)}{l}\right];$$

après transformation, on obtient

$$\frac{dY_{syst}}{dx}=\frac{2F_y}{l}\left[\frac{2\cdot1000}{3EJ}x^3-\frac{1000l}{EJ}x^2+\right.$$
$$\left.+\left(\frac{1000l^2}{3EJ}+\frac{W_p}{l}+\frac{W_c}{l}\right)x-W_p\right].$$

En égalant le deuxième terme à zéro, on obtient une équation du troisième degré qui s'écrit

$$\frac{2\cdot1000}{3EJ}x^3-\frac{1000l}{EJ}x^2+\left(\frac{1000l^2}{3EJ}+\frac{W_p}{l}+\frac{W_c}{l}\right)x-W_c=0.$$

En désignant

$$\frac{2\cdot1000}{3EJ}=a\,;\quad -\frac{1000l}{EJ}=b\,;\quad \frac{1000l^2}{3EJ}+\frac{W_p}{l}+\frac{W_c}{l}=c\,;\quad -W_c=d,$$

on obtient une équation du troisième degré

$$ax^3+bx^2+cx+d=0\,;$$

la substitution

$$y=x+\frac{1}{3}\cdot\frac{b}{a}=x-\frac{l}{2}$$

conduit à l'équation du type

$$y^3+3py+2q=0,$$

où

$$p=\frac{1}{3}\cdot\frac{c}{a}-\frac{1}{9}\left(\frac{b}{a}\right)^2=\frac{EJ}{2\cdot1000l}(W_p+W_c)-\frac{l^2}{12}\,;$$

$$q=\frac{1}{27}\left(\frac{b}{a}\right)^3-\frac{1}{6}\cdot\frac{bc}{a^2}+\frac{d}{2a}=\frac{3EJ}{8\cdot1000}(W_c-W_p).$$

La résolution de cette équation du troisième degré permet de définir y_1, y_2, y_3 dont les valeurs permettent de calculer les x par substitution

$$x=y+\frac{l}{2}. \tag{30}$$

Lorsque la flexibilité de la poupée et de la contre-poupée est la même (et comme nous allons le voir dans ce qui suit, il faut s'efforcer de la rendre telle), on a

$$W_c-W_p=0\,;$$

donc

$$q=\frac{3EJ}{8\cdot1000}(W_c-W_p)=0.$$

Dans ce cas l'équation du troisième degré s'écrit

$$y^3+3py=0$$

ou

$$y\,(y^2+3p)=0,$$

d'où il vient

$$y_1=0\,;\quad y_2=\sqrt{-3p}\,;\quad y_3=-\sqrt{-3p}, \tag{31}$$

où

$$p=\frac{EJ}{2\cdot1000l}(W_p+W_c)-\frac{l^2}{12}=\frac{EJ\cdot2W_{pc}}{2\cdot1000l}-\frac{l^2}{12}=\frac{EJW_{pc}}{1000l}-\frac{l^2}{12}.$$

En prenant à titre d'exemple les valeurs de $E=2{,}2\cdot10^4$ et de $J=\frac{\pi d^4}{64}$, on tire

$$p=\frac{2{,}2\cdot10^4\pi d^4W_{pc}}{1000l\cdot64}-\frac{l^2}{12}$$

ou

$$p=\frac{1{,}1d^4W_{pc}}{l}-\frac{l^2}{12}. \tag{32}$$

Pour $d=50$ mm ; $l=300$ mm et $W_{pc}=0{,}26$ μ/kg,

$$p=\frac{1\cdot1\cdot50^4\cdot0{,}26}{300}-\frac{300^2}{12}=-1541{,}67\,;$$

dans ce cas

$$y=\pm\sqrt{-3p}=\pm\sqrt{-3(-1541{,}67)}=\pm\sqrt{4625},$$

d'où

$$y_1=0\,;\quad y_2=68\,;\quad y_3=-68.$$

En remplaçant y par les valeurs obtenues, on a

$$x_1=y_1+\frac{l}{2}=\frac{300}{2}=150\,;$$

$$x_2=y_2+\frac{l}{2}=68+\frac{300}{2}=218\,;$$

$$x_3=y_3+\frac{l}{2}=-68+\frac{300}{2}=82.$$

En exprimant ces grandeurs en fractions de la longueur de l'ébauche $l=300$ mm, on trouve

$$x_1=\frac{150}{300}=0{,}5l\,;\quad x_2=\frac{218}{300}\approx0{,}73l\,;\quad x_3=\frac{82}{300}\approx0{,}27l.$$

En posant $F_y = 44$ kg, $W_{ch} = 0{,}36$ μ/kg et en remplaçant x_2 et x_3 de la formule (29) par leurs valeurs, on obtient dans les deux cas des refoulements totaux identiques pour le système machine-pièce: $Y_{1syst} = Y_{2syst} = 25$ μ; cela signifie que, dans les conditions considérées, les refoulements du système élastique se répartissent d'une manière symétrique par rapport à la section $x = 0{,}5l$ pour laquelle cette même formule (29) donne

$$Y_{syst\ (\text{pour}\ x=0{,}5l)}=25{,}3\ \mu.$$

Lorsque $x_2 = 218$ mm ou $0{,}73l$ et $x_3 = 83$ mm ou $0{,}27l$, les refoulements du système machine-pièce sont minima, car si on les calcule d'après la formule (29) on obtient dans le cas considéré, près de la poupée et de la contre-poupée, la valeur suivante du refoulement

$$Y_{syst\ (\text{près des poupées})}=27{,}3\ \mu.$$

La méthode exposée du calcul des refoulements maxima et minima du système élastique machine-pièce présente les inconvénients suivants:

1. Un grand volume de travail de calcul nécessaire pour résoudre l'équation du troisième degré; ce n'est que lorsque la rigidité de la poupée et de la contre-poupée est la même que cette équation se réduit au deuxième degré en réduisant ainsi nettement le volume de travail.

2. Il existe des cas où les résultats se présentent sous forme de racines imaginaires, impossibles à transformer par des procédés algébriques en racines réelles, et rendant nécessaire le recours à une solution trigonométrique qui complique les calculs.

3. Les résultats du calcul des racines cubiques sont approchés, car les valeurs obtenues au cours du calcul doivent être toujours arrondies.

Par ailleurs, en calculant par ce procédé les refoulements minima du système élastique machine-pièce, il est impossible d'obtenir une solution unique de même qu'il en a été dans le cas du calcul suivant les formules (27) et (28) du refoulement de l'ébauche usinée et de la machine-outil, car les valeurs des racines d'une équation du troisième degré changent en fonction du rapport des refoulements de la machine et de la flèche de l'ébauche, ainsi que des valeurs de p et de q qui leur sont associées.

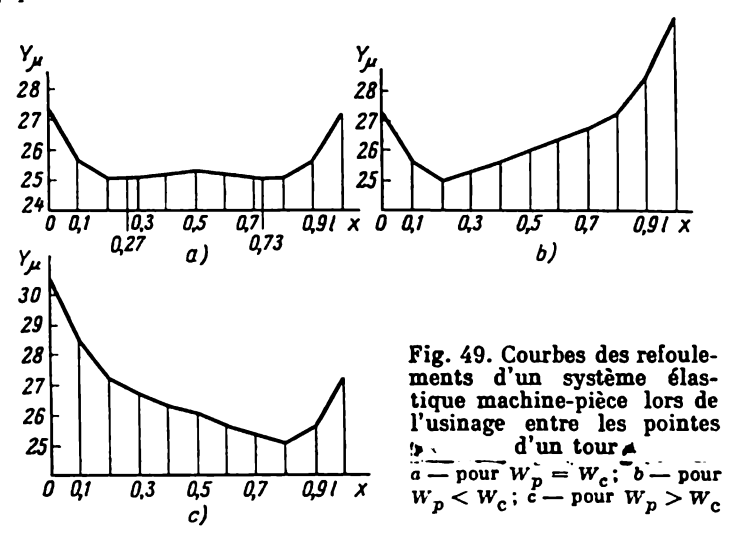


Fig. 49. Courbes des refoulements d'un système élastique machine-pièce lors de l'usinage entre les pointes d'un tour :
a — pour $W_p = W_c$; b — pour $W_p < W_c$; c — pour $W_p > W_c$

Les considérations susmentionnées rendent utile la recherche d'un autre procédé de détermination des positions de l'outil le long de l'axe de l'ébauche qui correspondent aux refoulements minima et maxima du système élastique machine-pièce.

Une image représentative des refoulements du système machine-pièce est donnée par les courbes (fig. 49) construites suivant la formule (29).

L'examen de ces courbes amène à conclure que leur caractéristique est fonction de la flexibilité de la poupée et de la contre-poupée et du quotient $l : d$ de l'ébauche usinée. Si la flexibilité de la poupée et de la contre-poupée est la même, la courbe des refoulements est symétrique par rapport à la section $x = 0{,}5\ l$. Dans ce cas le défaut de forme de la surface travaillée est minimal, et l'écart de la cote à observer est minimal lui aussi ; il faut donc s'appliquer à rendre $W_c = W_p$. La petite bosse que forment les courbes de refoulements au droit de la section $x = 0{,}5\ l$ résulte de la flèche maximale de l'ébauche dans cette section et de la forme en tonneau qu'acquiert l'ébauche sous l'effet des refoulements de la machine. A mesure que le quotient $l : d$ augmente, la bosse qui correspond à la section $x = 0{,}5\ l$ s'accroît ; lorsque ce quotient diminue, la bosse diminue

elle aussi pour disparaître à peu près lorsque $l : d \leqslant 3$. Dans ce cas Y_{syst} n'est défini que par les refoulements de la machine.

Pour des buts pratiques, la précision est suffisante si on se borne à calculer les refoulements pour chaque 0,1 l (de la longueur de l'ébauche). Dans ce cas, les calculs peuvent être simplifiés en utilisant des valeurs déjà calculées[1] de $\left(\frac{l-x}{l}\right)^2$, $\left(\frac{x}{l}\right)^2$ et $\frac{(l-x)^2x^2}{l}$.

Le mode de calcul des positions de l'outil le long de l'axe de l'ébauche qui correspondent aux refoulements maxima ou minima du système machine-pièce prévoit les opérations suivantes.

La formule (29) donne pour $x = 0$ (près de la poupée)

$$Y_{syst} = F_y (W_{ch} + W_p); \tag{33}$$

pour $x = l$ (près de la contre-poupée)

$$Y_{syst} = F_y (W_{ch} + W_c). \tag{34}$$

Si la flexibilité de la poupée et de la contre-poupée est la même $W_p = W_c = W_{pc}$, pour les deux poupées Y_{syst} est défini par la formule

$$Y_{syst} = F_y (W_{ch} + W_{pc}).$$

Lorsque l'outil se trouve en position $x = 0{,}5\, l$, Y_{syst} est calculé en transformant la formule (29) :

$$Y_{syst} = F_y \left[W_{ch} + 0{,}5 W_{pc} + \frac{0{,}0194}{d} \left(\frac{l}{d}\right)^3\right];$$

dans ces calculs on pose $E = 2{,}2 \cdot 10^4$ et $J = \frac{\pi d^4}{64}$.

Le refoulement du système machine-ébauche est maximal lorsque l'outil est soit près des poupées, soit au milieu ($x = 0{,}5\, l$) ; il varie en fonction du refoulement total des ensembles de la machine et de la flèche de l'ébauche ; il se peut également qu'il y ait trois maximums pour l'outil se trouvant respectivement dans les positions suivantes : près de la poupée, près de la contre-poupée et au milieu. Le refoulement minimal du système est donné par les formules (30) à (32) pour l'outil se trouvant en positions x_2 et x_3:

$$x_2 = \sqrt{-3p} + \frac{l}{2};$$

$$x_3 = -\sqrt{-3p} + \frac{l}{2},$$

où

$$p = \frac{1{,}1 d^4 W_{pc}}{l} - \frac{l^2}{12}.$$

[1] Voir Annexe 4.

Notons que x_2 et x_3 sont symétriques par rapport à la section $x = 0{,}5\ l$.

Si la flexibilité des poupées est différente ($W_p < W_c$ ou $W_p > W_c$), le calcul de Y_{syst} près de la poupée ($x = 0$) et près de la contre-poupée ($x = l$) se fait suivant les formules (33) et (34). Ensuite la formule (28) permet d'obtenir x_m. Pour $x_m < 0{,}5\ l$, les calculs de Y_{syst} sont effectués selon la formule (29) pour les positions de l'outil dans l'intervalle de $x = 0{,}1\ l$ à $x = 0{,}5\ l$; pour $x_m > 0{,}5\ l$, dans l'intervalle de $x = 0{,}5\ l$ à $x = 0{,}9\ l$. Les valeurs de Y_{syst} près de la poupée, près de la contre-poupée et dans les intervalles considérés ainsi obtenues permettent d'écrire

$$\Delta Y = Y_{max} - Y_{min}.$$

Pour définir pratiquement la valeur minimale de Y_{syst}, il suffit de la calculer soit pour $x = 0{,}1\ l$ et $x = 0{,}2\ l$ ($x_m < 0{,}5\ l$), soit pour $x = 0{,}8\ l$ et $x = 0{,}9\ l$ ($x_m > 0{,}5\ l$); dans les cas peu clairs on peut faire un calcul supplémentaire pour $x = 0{,}3\ l$ ou pour $x = 0{,}7\ l$, c'est-à-dire deux ou trois calculs beaucoup plus simples que celui des trois racines de l'équation du troisième degré. Pour tous ces calculs on peut faire appel à la formule

$$Y_{syst} = F_y\left[W_{ch} + W_p\left(\frac{l-x}{l}\right)^2 + W_c\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{0{,}31\,(x-l)^2\,x^2}{d^4 l}\right]. \quad (35)$$

La valeur de Y_{syst} est maximale soit près de la poupée la moins rigide, soit lorsque $x = 0{,}5\ l$ en fonction du rapport entre le refoulement total des ensembles de la machine et la flèche de l'ébauche [1].

Du fait des variations des efforts de coupe et des refoulements du système élastique machine-pièce, l'accroissement limite de la cote à respecter ΔY est défini par la différence entre le refoulement maximal et le refoulement minimal:

$$\Delta Y = Y_{max} - Y_{min}. \quad (36)$$

Lorsque la composante F_y de l'effort de coupe et la flexibilité du système W_{syst} sont variables, on a

$$Y_{max} = F_{y_{max}} W_{max};$$

$$Y_{min} = F_{y_{min}} W_{min},$$

donc

$$\Delta Y = F_{y_{max}} W_{max} - F_{y_{min}} W_{min}. \quad (37)$$

Lors du façonnage des surfaces de révolution extérieures et intérieures, ΔY correspond à la différence des refoulements radiaux

[1] Les valeurs moyennes de la flexibilité des ensembles et les flexibilités totales de certaines machines-outils sont données dans les Annexes 3b et 3c.

limites; donc, pour définir les variations du diamètre, la valeur de ΔY doit être doublée

$$2\Delta Y = 2\,(Y_{max} - Y_{min})\,; \tag{38}$$

$$2\Delta Y = 2\,(F_{y_{max}} W_{max} - F_{y_{min}} W_{min}). \tag{39}$$

Les maximums et les minimums des refoulements totaux d'un système machine-pièce forment des combinaisons diverses (un maximum et un minimum, un maximum et deux minimums, deux maximums et deux minimums, trois maximums et deux minimums, etc.) [1] définies par la flexibilité de la poupée et de la contre-poupée de la machine et la flèche de l'ébauche.

D'après la formule (37), pour calculer l'accroissement limite ΔY de la cote à respecter, il faut définir les valeurs de $F_{y_{max}}$ et de $F_{y_{min}}$; examinons donc les procédés permettant de calculer les valeurs maximale et minimale de la composante F_y de l'effort de coupe.

Lors du travail avec des outils à charioter (tournage extérieur, intérieur et rabotage), la composante F_y, normale à la surface usinée, est définie en théorie de la coupe des métaux, comme on sait, par la formule

$$F_y = C_y p^x a^y H_B^n, \tag{40}$$

où C_y est le coefficient définissant les conditions de service de l'outil;
p, la profondeur de coupe en mm;
a, l'avance en mm/tr;
H_B, la dureté Brinell du matériau en kg/mm².

La valeur du coefficient C_y varie en fonction des conditions de coupe (métal d'œuvre, obliquité du profil, arrondi du nez de l'outil, écarts de l'affûtage indiqué de l'angle de pente, usure de l'outil suivant la surface en dépouille). Les variations du coefficient C_y sont compensées en multipliant sa valeur trouvée dans un tableau par des coefficients correctifs.

Lors de l'usinage d'un lot d'ébauches par le procédé d'obtention automatique des cotes sur des machines préalablement réglées, la valeur du coefficient C_y change en fonction de l'usure de l'outil.

La durée de l'outil à la différence de la tenue dimensionnelle est le temps de travail d'un outil jusqu'au moment où ses propriétés de coupe dégradent par suite de l'usure de la surface en dépouille ou de la surface d'attaque, ou encore de l'ensemble de ces deux surfaces, ce dernier mode d'usure ayant lieu lors du travail sans arrosage, à des régimes très chargés.

---

[1] Voir Annexe 4.

La tenue dimensionnelle de l'outil est le temps de son travail défini par l'usure suivant la normale à la surface usinée; cette usure entraîne l'accroissement de la cote à respecter; compte tenu d'autres facteurs, la valeur de l'usure dimensionnelle d'un outil est limitée par la tolérance imposée sur la cote à obtenir.

La dureté des pièces, appartenant à plusieurs lots produits à partir d'un métal fourni par des coulées différentes, peut varier dans les limites établies par le cahier des charges de $H_{B_{\min}}$ à $H_{B_{\max}}$; lors de leur usinage sur des machines réglées au préalable, la valeur de l'avance a est constante, alors que la profondeur de coupe peut changer de $p_{\min}$ à $p_{\max}$ suivant la tolérance sur la cote de l'ébauche, les écarts de forme et de position, les défauts de sa mise en place, ainsi que les défauts de géométrie de la machine; la valeur C_y change également de $C_{y_{\min}}$ à $C_{y_{\max}}$ en fonction de l'émoussage de l'arête tranchante.

Dans le cas de plusieurs lots d'ébauches, on peut connaître la valeur de la composante de l'effort de coupe normale à la surface travaillée

$$F_{y_{\max}} = C_{y_{\max}} p_{\max}^{x} a^{y} H_{B_{\max}}^{n}; \quad (41)$$

$$F_{y_{\min}} = C_{y_{\min}} p_{\min}^{x} a^{y} H_{B_{\min}}^{n}. \quad (42)$$

La valeur de C_y des formules (41) et (42) est choisie, comme nous l'avons déjà dit, d'après les conditions de coupe. A cet effet, la valeur de C_y est multipliée par le coefficient K_h [1] choisi en fonction de l'usure de la surface en dépouille de l'outil suivant les données ci-dessous:

Usure de la surface en dépouille, mm	0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Coefficient K_h:							
acier, fonderie d'acier et fonte malléable	0,70	0,52	0,65	0,82	1,00	—	—
fonte grise	0,33	—	0,38	—	0,58	0,80	1,00

Pour calculer $F_{y_{\max}}$ on prend $C_{y_{\max}}$; alors

$$C_{y_{\max}} = C_y K_h'.$$

Les valeurs de K_h sont choisies suivant les données indiquées en partant de l'usure de la surface en dépouille et compte tenu du temps de coupe total nécessaire pour l'exécution de l'ensemble du lot.

[1] Pour calculer $F_{y_{\max}}$, le coefficient est noté par le symbole K_h'; pour calculer $F_{y_{\min}}$, par le symbole K_h''.

Pour définir $F_{y_{min}}$, on pose

$$C_{y_{min}} = C_y K_h'',$$

où $K_h'' = 0,52$ ou 0,33 suivant le métal en œuvre.

Les efforts de coupe changent avec la vitesse de coupe. Pour tenir compte de ces variations, les valeurs de la composante de l'effort de coupe F_y fournies par les formules doivent être multipliées par des coefficients correctifs K_v; pour l'acier et la fonte grise ces coefficients ont les valeurs suivantes:

Vitesse de coupe v, en m/mn	10	20	30	40	50	60
Coefficient K_v	0,68	0,70	0,91	0,98	1,00	0,91
Vitesse de coupe v, en m/mn	80	100	120	160	200	240
Coefficient K_v	0,78	0,73	0,70	0,69	0,68	0,68

Pour illustrer le calcul des valeurs $F_{y_{max}}$ et $F_{y_{min}}$ examinons les cas a) d'une ébauche unitaire; b) d'un lot d'ébauches et c) de plusieurs lots d'ébauches.

Posons pour tous les exemples à examiner: la flexibilité des ensembles de la machine: $W_{ch} = 0,36$ μ/kg; $W_p = 0,26$ μ/kg; $W_c = 0,34$ μ/kg. La matière d'œuvre est un acier laminé à chaud d'une précision usuelle (diamètre $50^{+0,4}_{-1}$ mm, longueur 300 mm, dureté $H_B = 200$ à 240 kg/mm²). L'outil est mis à la profondeur de coupe $p = 1,6$ mm.

Exemple 1. Pour une ébauche unitaire on peut poser que C_y et H_B sont des constantes. Si on tient compte que sur une machine-outil réglée au préalable l'avance ne change pas, et si on pose

$$C_y a^y H_B^n = A,$$

il vient

$$F_y = A p^x.$$

Prenons pour une ébauche unitaire le coefficient $K_h' = 0,7$; le tableau donne $C_y = 0,0027$; ainsi,

$$C_y = 0,0027 \cdot 0,7 \approx 0,0019;$$

posons l'avance $a = 0,4$ mm/tr et prenons la dureté du métal H_B 200; dans ces conditions

$$A = 0,0019 \cdot 0,4^{0,75} \cdot 200^2 = 38,23;$$

ainsi, pour notre exemple, $F_y = 38,23\ p^x$.

Lorsque l'outil se trouve près de la contre-poupée, la formule (34) permet d'obtenir

$$Y_{ins} = 38,23 \cdot 1,6^{0,9}\,(0,36 + 0,34) \approx 41\ \mu.$$

Ce refoulement instantané fait que la profondeur de coupe diminue:

$$p = 1,6 - 0,041 \approx 1,56\ \text{mm};$$

donc, le refoulement devrait diminuer lui aussi; pourtant pratiquement il ne change pas, car pour cette nouvelle profondeur de coupe près de la contre-poupée

$$Y_{syst} = 38,23 \cdot 1,56^{0,9}\,(0,36 + 0,34) \approx 40\ \mu,$$

et donc la profondeur de coupe ne diminue pratiquement pas :

$$p=1{,}6-0{,}04=1{,}56 \text{ mm.}$$

Vérifions Y_{syst} pour le cas où l'outil se trouve au milieu, entre les deux poupées. D'après la formule (29)

$$Y_{syst}=38{,}23\cdot 1{,}56^{0,9}\Big(0{,}36+0{,}26\cdot 0{,}25+0{,}34\cdot 0{,}25+$$
$$+\frac{1000\cdot 64}{3\cdot 2{,}2\cdot 10^4\pi\cdot 50^4}\cdot\frac{150^2\cdot 150^2}{300}\Big)=33{,}9\ \mu ;$$

le refoulement maximal se situe donc près de la contre-poupée : $Y_{max}=40\ \mu$.

Pour définir la position relative de l'outil dans le cas de Y_{min}, utilisons la formule (28) permettant de trouver la grandeur

$$x_m=\frac{0{,}26}{0{,}26+0{,}34}\ l=0{,}433\ l<0{,}5\ l ;$$

calculons donc suivant la formule (35) les refoulements du système machine-pièce pour les positions de l'outil $x=0{,}1\ l$ et $x=0{,}2\ l$:

$$Y_{syst}=F_y\left[W_{ch}+W_p\left(\frac{l-x}{l}\right)^2+W_c\left(\frac{x}{l}\right)^2+\frac{0{,}31}{d^4}\cdot\frac{(l-x)^2x^2}{l}\right].$$

a) Déterminons Y_{syst} pour $x=0{,}1\ l$:

$$Y_{syst}=38{,}23\cdot 1{,}6^{0,9}\left[0{,}36+0{,}26\cdot 0{,}81+0{,}34\cdot 0{,}01+\frac{0{,}31}{50}\cdot 0{,}0081\cdot 6^3\right]=33{,}8\ \mu.$$

b) Pour $x=0{,}2\ l$:

$$Y_{syst}=58{,}34\left[0{,}36+0{,}26\cdot 0{,}64+0{,}34\cdot 0{,}04+\frac{0{,}31}{50}\cdot 0{,}0256\cdot 6^3\right]=32{,}3\ \mu.$$

Vérifions en calculant Y_{syst} pour $x=0{,}3\ l$:

$$Y_{syst}=58{,}34\left[0{,}36+0{,}26\cdot 0{,}49+0{,}34\cdot 0{,}09+\frac{0{,}31}{50}\cdot 0{,}0441\cdot 6^3\right]=33{,}8\ \mu,$$

donc Y_{min} correspond à $x=0{,}2\ l$.

A cette distance la profondeur de coupe est

$$p=1{,}6-0{,}0323\approx 1{,}57 \text{ mm.}$$

Dans ces conditions, la valeur de Y_{min} :

$$Y_{min}=38{,}23\cdot 1{,}57^{0,9}\,(0{,}36+0{,}1664+0{,}0136+0{,}0343)\approx 33\ \mu.$$

Ainsi, les refoulements du système technologique et l'instabilité de l'effort de coupe augmentent la cote de

$$\Delta Y=Y_{max}-Y_{min}=40-33\approx 7\ \mu.$$

Cette valeur de ΔY ne tient pas compte des défauts de forme de l'ébauche. Lovalisation de 0,7 mm de l'ébauche peut augmenter de 0,35 mm la profondeur

de coupe et porter le refoulement à

$$Y_{max} = 38,23\,(1,57 + 0,35)^{0,9} \cdot (0,36 + 0,34) \approx 47,8\ \mu\ ;$$

i lest évident que le refoulement minimal a lieu lorsque la profondeur de coupe et la flexibilité du système sont minimales, c'est-à-dire lorsque $Y_{min} = 33\ \mu$; ainsi, compte tenu des défauts de forme :

$$\Delta Y = 47,8 - 33 \approx 15\ \mu.$$

Exemple 2. Pendant l'exécution d'un lot d'ébauches, les valeurs de C_y et, donc, de F_y augmentent par suite de l'émoussage de l'outil. Si le lot d'ébauches est fabriqué à partir du métal fourni par une même coulée, les variations de dureté sont négligeables et l'on peut poser que H_B est constant. Dans ces conditions, et compte tenu de C_y qui augmente jusqu'à 0,0027, il vient

$$A = 0,0027 \cdot 0,4^{0,75} \cdot 200^2 = 54,32.$$

Au départ de la coupe, l'ébauche dont la cote limite est minimale subit un refoulement instantané lorsque l'outil se trouve près de la contre-poupée

$$Y_{ins} = 54,32 \cdot 1,6^{0,9} \cdot 0,7 = 58\ \mu.$$

La profondeur de coupe résultant de ce refoulement vaut

$$p = 1,6 - 0,058 \approx 1,54\ \text{mm}\ ;$$

le refoulement maximal

$$Y_{max} = 54,32 \cdot 1,54^{0,9} \cdot 0,7 = 56\ \mu.$$

Pour une ébauche dont le diamètre limite est maximal, la profondeur de coupe augmente de 0,7 mm ; dans ce cas, l'outil se trouvant près de la contre-poupée subit un refoulement instantané

$$Y_{ins} = 54,32\,(1,6 + 0,7)^{0,9} \cdot 0,7 \approx 80\ \mu.$$

La profondeur de coupe qui en résulte

$$p = 2,3 - 0,08 = 2,22\ \text{mm}\ ;$$

le refoulement maximal devient

$$Y_{max} = 54,32 \cdot 2,22^{0,9} \cdot 0,7 = 78\ \mu.$$

Le refoulement minimal pour un lot d'ébauches correspond à

$$C_{y_{min}} = 0,0027 \cdot 0,52 = 0,0014$$

et

$$A = 0,0014 \cdot 0,4^{0,75} \cdot 200^2 = 28,17\ ;$$

dans ces conditions on obtient

$$Y_{ins} = 28,17 \cdot 1,6^{0,9} \cdot 0,7 = 30\ \mu\ ;$$

$$p = 1,60 - 0,03 = 1,57\ \text{mm}\ ;$$

$$Y_{min} = 28,17 \cdot 1,57^{0,9} \cdot 0,7 \approx 24\ \mu\ ;$$

ainsi, pour un lot d'ébauches l'accroissement maximal de la cote est

$$\Delta Y = Y_{max} - Y_{min} = 78 - 24 = 54\ \mu.$$

Exemple 3. Dans le cas d'usinage d'un ensemble de plusieurs lots d'ébauches il faut tenir compte des variations éventuelles de la dureté dans les limites des écarts admissibles, c'est-à-dire jusqu'à $H_B = 240$. Pour la dureté $H_B = 240$ on obtient

$$A = 0{,}0027 \cdot 0{,}4^{0,75} \cdot 240^2 = 78{,}23.$$

Le refoulement instantané au moment de l'attaque de l'outil

$$Y_{ins} = 78{,}23 p^x \cdot 0{,}7 = 78{,}23\,(1{,}6 + 0{,}7)^{0,9} \cdot 0{,}7 \approx 116\ \mu.$$

Sous l'effet du refoulement instantané la profondeur de coupe diminue jusqu'à :

$$p = (1{,}6 + 0{,}7) - 0{,}116 = 2{,}18,$$

et le refoulement maximal devient égal à :

$$Y_{max} = 78{,}23 \cdot 2{,}18^{0,9} \cdot 0{,}7 = 111\ \mu.$$

Pour un ensemble de plusieurs lots, le refoulement minimal reste le même : $Y_{min} = 24\ \mu$. Dans le cas de plusieurs lots, l'accroissement limite de la cote résultant de l'instabilité de l'effort de coupe et des refoulements est donc

$$\Delta Y = Y_{max} - Y_{min} = 111 - 24 = 87\ \mu.$$

Ainsi dans les mêmes conditions d'usinage, les valeurs de ΔY varient de la façon suivante : a) pour une ébauche unitaire $\Delta Y = 15\ \mu$; b) pour un lot d'ébauches, $\Delta Y = 54\ \mu$; c) pour un ensemble de plusieurs lots d'ébauches, $\Delta Y = 87\ \mu$.

La différence des refoulements limites définit l'accroissement limite de la cote résultant des variations de l'effort de coupe.

Lorsque l'usinage se fait avec des outils multiples, on pose que la force F_y correspond à la résultante des composantes des efforts de coupe des outils, normales à la surface travaillée. Pour des arbres à fusées, F_y est calculé pour chaque fusée en fonction de la profondeur et de la vitesse de coupe de la fusée considérée. Le point d'application de la résultante est établi par l'addition successive des efforts produits par les outils à mesure qu'ils attaquent la pièce. En faisant ce calcul on établit, si possible, les flèches des fusées.

Lorsque l'usinage des surfaces a lieu sur des fraiseuses verticales, la flexibilité totale (W_m) des ensembles de la machine dans le sens de la normale à la surface usinée est calculée d'après la formule

$$W_m = W_b + W_{corps} + W_{t\text{-}cons}, \qquad (43)$$

où W_b est la flexibilité verticale de l'ensemble de la broche ;
W_{corps}, la flexibilité du corps de cet ensemble ;
$W_{t\text{-}cons}$, la flexibilité du système table-console.

D'après les données empiriques le refoulement d'un système table-console est 6 fois plus important lorsque la console, le chariot et la table sont débloqués que lorsque la console et le chariot sont bloqués et la table débloquée.

Citons à titre d'exemple les résultats de l'étude de la flexibilité des ensembles d'une fraiseuse verticale.

Pour la console et le chariot bloqués et la table débloquée, la composante verticale de l'effort de coupe étant $F_v = 312$ kg, c'est-à-dire dans les conditions d'usinage courant, le refoulement du système table-console $Y_{t\text{-}cons} = 3\ \mu$, d'où la flexibilité

$$W_{t\text{-}cons} = \frac{Y_{t\text{-}cons}}{F_v} = \frac{3}{312} \approx 0{,}01\ \mu/\text{kg}.$$

Le refoulement du corps de l'ensemble de la broche $Y_{corps} = 57\ \mu$. La flexibilité du corps

$$W_{corps} = \frac{57}{312} \approx 0{,}18\ \mu/\text{kg}.$$

Le refoulement de l'ensemble de la broche $Y_b = 60\,\mu$. La flexibilité de l'ensemble de la broche

$$W_b = \frac{60}{312} = 0{,}2\ \mu/\text{kg}.$$

La flexibilité totale des ensembles de la machine

$$W_m = W_b + W_{corps} + W_{t\text{-}cons} = 0{,}2 + 0{,}18 + 0{,}01 \approx 0{,}4\ \mu/\text{kg}.$$

Le serrage du mandrin de l'outil dans la broche d'une fraiseuse verticale est suffisamment rigide pour qu'on puisse ne pas tenir compte de la flexibilité de l'outil.

Pourtant il faut noter que l'action des composantes verticale F_v et horizontale F_h de l'effort de coupe sur les réactions des paliers de la broche provoque le refoulement et compromet la position verticale de la broche. Le calcul de cette action commune de F_v et F_h est très compliqué, il ne peut être qu'approximatif. Dans ce qui suit, on se limitera à tenir compte uniquement des refoulements des ensembles de la machine dirigés dans le sens de la normale à la surface usinée.

La mise en place des ébauches sur des fraiseuses verticales rend possible la répartition de cales fixes ou réglables de façon à prévenir les refoulements élastiques de l'ébauche qui dégradent nettement la précision d'usinage. En calculant donc les erreurs d'usinage on peut poser que l'ébauche est rigide.

Ainsi, pour calculer l'erreur d'usinage sur une fraiseuse verticale, défaut résultant des variations de l'effort de coupe, on se borne dans la plupart des cas à ne tenir compte que de la flexibilité totale de la machine, qui est constante par suite de la position centrale constante de l'outil.

L'effort de coupe circonférenciel F kg est défini par la formule

$$F = C p^x a_z^y z B^z D^q, \qquad (44)$$

où C est le coefficient définissant les conditions de coupe;
p, la profondeur de coupe, mm;
a_z, l'avance par dent de la fraise, mm;
z, le nombre de dents de la fraise;
B, la largeur du fraisage, mm;
D, le diamètre de la fraise, mm.

Pour le fraisage en bout, les valeurs des composantes de l'effort de coupe peuvent être les suivantes.

La composante axiale (normale à la surface d'usinage) $F_v = 0{,}5\,F$.

La composante horizontale (parallèle à la surface usinée) pour une coupe symétrique $F_h = 0{,}4\,F$; pour une coupe non symétrique en avalant, $F'_h = 0{,}8\,F$; pour une coupe non symétrique en opposition, $F''_h = 0{,}3\,F$.

On sait que dans le fraisage en bout la largeur de coupe B est définie par la profondeur de la tranche cisaillée, alors que la profondeur de coupe p est définie par la cote de la surface usinée dans le sens perpendiculaire à l'avance; en calculant donc les valeurs limites de la composante de l'effort de coupe normale à la surface usinée, il vient

$$F_{v_{\min}} = 0{,}5\ C p^x a_z^y z B_{\min}^z D^q; \tag{45}$$

$$F_{v_{\max}} = 0{,}5\ K_h C p^x a_z^y z B_{\max}^z D^q, \tag{46}$$

où K_h est le coefficient définissant l'accroissement de l'effort de coupe dû à l'émoussage des dents de la fraise.

Pour les aciers tenaces $K_h = 1{,}75 \div 1{,}90$; pour les aciers moyens et durs, ainsi que pour les fontes, $K_h = 1{,}2 \div 1{,}4$.

Comme nous l'avons déjà dit, dans le cas du façonnage des plans sur une fraiseuse verticale, nous pouvons poser avec une précision suffisante pour la pratique que la flexibilité du système est constante. Le refoulement élastique maximal peut s'écrire alors

$$Y_{\max} = F_{v_{\max}} W_m,$$

et le refoulement élastique minimal

$$Y_{\min} = F_{v_{\min}} W_m.$$

La différence entre les valeurs limites des refoulements élastiques

$$\Delta Y = W_m (F_{v_{\max}} - F_{v_{\min}}) \tag{47}$$

définit la dispersion de la cote à observer due aux variations d'épaisseur de la couche enlevée et l'augmentation de l'effort de coupe résultant de l'émoussage des dents de la fraise en période terminale de sa durée de service.

Exemple. Supposons que pendant l'exécution d'un lot d'ébauches, l'usure (émoussage) des dents de la fraise fasse varier la valeur de C de $C' = 82$ à $C'' = 107$, alors que la largeur de fraisage B change dans les limites de la tolérance prévue de $B' = 1{,}5$ mm à $B'' = 4{,}2$ mm.

Dans ces conditions, on a

$$F_{v_{max}} = 0{,}5 \cdot 107 \cdot 130^{1,1} \cdot 0{,}12^{0,8} \cdot 6 \cdot 4{,}2^{0,95} \cdot 150^{-1,1} = 216{,}4 \text{ kg};$$

$$F_{v_{min}} = 0{,}5 \cdot 82 \cdot 130^{1,1} \cdot 0{,}12^{0,8} \cdot 6 \cdot 1{,}5^{0,95} \cdot 150^{-1,1} = 63{,}5 \text{ kg}.$$

En posant que le travail est effectué sur une fraiseuse verticale et que la flexibilité de ces ensembles bloqués (sauf la table) est $W_m = 0{,}4$ μ/kg, on obtient

$$\Delta Y = W_m (F_{v_{max}} - F_{v_{min}}) = 0{,}4\,(216{,}4 - 63{,}5) = 61{,}2\ \mu,$$

c'est-à-dire pour la cote limite maximale, lorsque la largeur de fraisage (profondeur de la tranche cisaillée) est $B = 4{,}2$ mm, l'accroissement de la cote résultant du refoulement $Y_{max} = 86{,}6$ μ, alors que pour la cote limite minimale, lorsque la largeur de fraisage est $B = 1{,}5$ mm, $Y_{min} = 25{,}4$ μ ; la différence entre ces refoulements

$$Y_{max} - Y_{min} = 86{,}6 - 25{,}4 = 61{,}2\ \mu$$

constitue la dispersion de la cote à réaliser due à l'instabilité de l'effort de coupe pendant l'usinage du lot considéré.

Si les deux plans opposés sont fraisés simultanément sur une machine à tambour « duplex », ΔY constitue la différence entre les valeurs limites du refoulement élastique relatif à chaque côté; donc, pour définir la dispersion de la cote à respecter entre les surfaces usinées, ΔY doit être doublé ; on en déduit

$$2\Delta Y = 2W (F_{v_{max}} - F_{v_{min}}). \tag{48}$$

Tout en se limitant à exposer la méthode de calcul de la valeur ΔY pour le travail à l'outil et à la fraise en bout, notons qu'elle permet également de réaliser des calculs analogues pour d'autres machines et modes d'usinage. Rappelons, en passant, que le terme de déformations élastiques d'une machine se rapporte non seulement aux déformations de ses pièces isolées dont l'action est pratiquement infime sur les résultats d'usinage, mais également aux refoulements élastiques des joints des ensembles de la machine.

Le savant soviétique K. Votinov a été le premier à mettre en évidence le rôle de ces refoulements. Il a été suivi par le professeur A. Sokolovski, le professeur D. Réchétov, d'autres encore, dont les travaux ont considérablement favorisé l'essor de la théorie de la précision d'usinage.

B. Principes de variations des erreurs d'exécution des ébauches sur les machines-outils

Dans les conditions d'un système élastique machine-pièce-outil les défauts de forme et les écarts de position d'une pièce brute se reproduisent tout en diminuant progressivement avec chaque reprise et, si la gamme d'usinage est établie convenablement, peuvent être réduits à de très faibles valeurs. A la dernière reprise de la gamme d'usinage, ces erreurs ne doivent pas dépasser les valeurs admises par les spécifications techniques imposées à la pièce finie.

Désignons par le terme de coefficient de précision K_{pr} le quotient de l'erreur ΔY résultant de l'usinage effectué par l'erreur Δa existant avant l'usinage ; alors

$$K_{pr} = \frac{\Delta Y}{\Delta a}.$$

La valeur de Δa définit la différence des profondeurs de coupe : p qui inclut le défaut de forme et $(p - \Delta a)$ qui élimine ce défaut ; ainsi, pour une ébauche ovalisée, p est définie suivant le grand axe de l'ovale, alors que $(p - \Delta a)$, suivant le petit axe.

La formule (37) donne

$$\Delta Y = F_{y_{max}} W_{max} - F_{y_{min}} W_{min}.$$

Pour une section quelconque de l'ébauche la flexibilité du système qui la concerne est une valeur constante ; dans ces conditions, la formule (37) s'écrit

$$\Delta Y = W_{syst} (F_{y_{max}} - F_{y_{min}}).$$

Pour un travail unitaire, on a

$$C_y a^y H_B^n = A = \text{const}.$$

Ainsi, on obtient

$$F_{y_{max}} = A p^x ; \qquad F_{y_{min}} = A (p - \Delta a)^x$$

et

$$\Delta Y = W_{syst} A [p^x - (p - \Delta a)^x] ;$$

donc

$$K_{pr} = \frac{\Delta Y}{\Delta a} = \frac{W_{syst} A [p^x - (p - \Delta a)^x]}{\Delta a}. \qquad (49)$$

L'erreur restée après l'usinage ΔY_r (erreur résiduelle) est toujours inférieure à l'erreur initiale Δa ; par définition, le coefficient de précision doit être inférieur à l'unité : $K_{pr} < 1$; $\Delta Y_r < \Delta a$, donc

$$W_{syst} A [p^x - (p - \Delta a)^x] < \Delta a,$$

d'où la condition qui s'impose nécessairement:

$$W_{syst} < \frac{\Delta a}{A\,[p^x - (p - \Delta a)^x]},$$

car autrement il n'y aurait aucune amelioration de la précision, c'est-à-dire aucune diminution de l'erreur; l'erreur initiale peut même augmenter.

Ce fait est justifié par la pratique; ainsi, après le tournage fin par passes multiples on observe après un certain nombre de passes une augmentation de l'erreur résiduelle par rapport à la passe précédente. Cela signifie que l'erreur résiduelle ΔY_r est devenue si faible après la passe précédente que:

$$W_{syst} > \frac{\Delta Y_r}{A\,[p^x - (p - \Delta Y_r)^x]},$$

c'est-à-dire que la condition énoncée précédemment n'a pas été observée.

La formule (49) permet d'établir que

$$\Delta Y_r = K_{pr} \Delta a$$

ou

$$\Delta Y_r = \frac{W_{syst} A\,[p^x - (p - \Delta a)^x]}{\Delta a}\,\Delta a,$$

c'est-à-dire que l'erreur résiduelle

$$\Delta Y_r = W_{syst} A\,[p^x - (p - \Delta a)^x]. \qquad (50)$$

En usinage des surfaces de révolution, les valeurs de ΔY_r et de Δa sont définies suivant le rayon et doivent être doublées pour obtenir des valeurs diamétrales; dans ces conditions, certes, le coefficient de précision ne change pas.

Le même principe est justifié pour chaque passe d'une fraise en bout; toutefois, la profondeur de coupe p, définie par la cote de la surface usinée dans le sens perpendiculaire au mouvement de l'avance, peut être considérée comme constante, alors que la largeur de fraisage B, définie par la profondeur de la tranche cisaillée, change en fonction des erreurs de l'ébauche; il en résulte qu'en fraisage en bout symétrique

$$K_{pr} = \frac{\Delta Y}{\Delta a} = \frac{W_{syst} A\,[B^z - (B - \Delta a)^z]}{\Delta a} \qquad (49,a)$$

et respectivement, si la condition

$$W_{syst} < \frac{\Delta a}{A\,[B^z - (B - \Delta a)^z]}$$

s'impose nécessairement, on pose

$$A = 0{,}5\ C p^x a_z^y z D^q.$$

Pour calculer l'erreur résiduelle du fraisage en bout, on emploie la formule

$$\Delta Y_r = W_{syst} A\ [B^z - (B - \Delta a)^z]. \qquad (50,a)$$

Dans le cas où l'impératif est le même, ces conclusions sont également valables pour des écarts de position:

$$K_{pr} = \frac{\rho_r}{\rho_a} = \frac{W_{syst} A\ [p^x - (p - \rho_a)^x]}{\rho_a}; \qquad (51)$$

$$\rho_r = W_{syst} A\ [p^x - (p - \rho_a)^x]; \qquad (52)$$

$$K_{pr} = \frac{\rho_r}{\rho_a} = \frac{W_{syst} A\ [B^z - (B - \rho_a)^z]}{\rho_a}; \qquad (51,a)$$

$$\rho_r = W_{syst} A\ [B^z - (B - \rho_a)^z]; \qquad (52,a)$$

dans ces formules ρ_a est l'écart de position initial et ρ_r, l'écart de position résiduel.

Pour établir l'ordre de grandeur des coefficients de précision pour les reprises d'usinage successives, à titre d'exemple faisons quelques calculs. Posons qu'un rond d'acier laminé à chaud d'une précision courante de 130 mm de diamètre, long de 780 mm, est façonné dans les conditions de coupe les plus mauvaises, l'émoussage de l'outil ne dépassant pas sa valeur admissible et la dureté du métal atteignant la limite supérieure.

Dans ces conditions, en remplaçant C_y, x, y et n par leurs valeurs indiquées dans les ouvrages de référence et posant $W_{syst} = 0{,}5$ μ/kg, $a = 1{,}4$ mm/tr, $p = 2{,}5$ mm et $\Delta a = 0{,}7$ mm (ovalisation ne dépassant pas 1,4 mm), on obtient en utilisant la formule (49):

$$K'_{pr_1} = \frac{\Delta Y}{\Delta a} = \frac{0{,}5A'\ [2{,}5^{0,9} - (2{,}5 - 0{,}7)^{0,9}]}{700} = 0{,}082;$$

$$A' = 0{,}0027 \cdot 1{,}4^{0,75} \cdot 240^2 \approx 200;$$

donc, dans les conditions considérées le défaut de forme diminue après le dégrossissage suivant le diamètre de 1400 μ jusqu'à 1 400·0,082 ≈ 115 μ.

Après la finition

$$K''_{pr_1} = \frac{0{,}5A''\ (0{,}56^{0,9} - (0{,}56 - 0{,}06)^{0,9}]}{57{,}5} = 0{,}02;$$

$$A'' = C_y K_h K_v a^y H_B^n = 0{,}0027 \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}3^{0,75} \cdot 240^2 = 36{,}15,$$

c'est-à-dire l'ovalisation diminue de 115 jusqu'à ≈ 2,3 μ.

Dans l'expression qui définit A'', K_v est le coefficient correctif de l'effort de coupe qui est fonction de la vitesse de coupe.

Le coefficient de précision total

$$K_{pr_1} = 0,08 \times 0,02 = 0,0016$$

diminue l'erreur de départ de la pièce brute de 1400 μ à 1400·0,0016 ≈ 2,3 μ.

Dans les mêmes conditions, mais pour une autre position de l'outil, les coefficients de précision varient suivant la modification de la flexibilité du système W_{syst}.

Soit une ébauche à fraiser à section carrée de 130 mm de côté comportant une courbure locale atteignant 500 μ ; il en résulte que l'épaisseur B de la tranche cisaillée peut varier dans les limites de 0,5 mm ; en posant p = 130 mm, B = = 1,8 mm et W_m = 0,5 μ/kg suivant l'axe de la broche d'une fraiseuse verticale, on obtient d'après la formule (51,a) :

pour le dégrossissage

$$K'_{pr} = \frac{\rho_r}{\rho_a} = \frac{W_{syst} A\,[B^2 - (B - \rho_a)^2]}{\rho_a} ;$$

$$A = 0,5\,Cp^x a_z^y zD^q = 0,5 \cdot 82 \cdot 130^{1,1} \cdot 0,12^{0,8} \cdot 6 \cdot 150^{-1,1} = 43,2 ;$$

$$K'_{pr} = \frac{0,5 \cdot 43,2\,[2,3^{0,95} - (2,3 - 0,5)^{0,95}]}{500} = 0,02 ;$$

la courbure résiduelle est

$$\rho_r = 0,5 \cdot 0,02 = 0,01 \text{ mm} ;$$

pour la finition

$$A = 0,5\,CK_1K_2p^x a_z^y zD^q = 0,5 \cdot 82 \cdot 1,3 \cdot 0,96 \cdot 130^{1,1} \cdot 0,1^{0,8} \cdot 16 \cdot 150^{-1,1} = 39,5 ;$$

$$K''_{pr} = \frac{0,5 \cdot 39,5\,[0,51^{0,95} - (0,51 - 0,01)^{0,95}]}{10} = 0,02.$$

Le coefficient de précision total

$$K_{pr} = K'_{pr} K''_{pr} = 0,02 \cdot 0,02 = 0,0004$$

réduit l'erreur initiale à 500·0,0004 = 0,2 μ.

En usinage, l'exécution de chaque reprise produit de nouveaux défauts de forme et des écarts de position résultant des défauts géométriques de la machine, des erreurs de mise en place de l'ébauche et d'autres facteurs technologiques. Le défaut de forme total de la surface usinée et l'écart de position total constituent un ensemble d'erreurs résiduelles de l'ébauche et d'erreurs produites par l'exécution d'une reprise. Le principe de la diminution régulière des erreurs de l'ébauche et la connaissance de la méthode permettant de calculer les erreurs produites par l'exécution d'une reprise rendent possible le calcul du défaut de forme total, ainsi que des écarts de position de la surface élémentaire façonnée.

Par ailleurs, le coefficient de précision ne définit que le principe de la diminution des erreurs d'une pièce brute ; le calcul donne sa valeur approchée, sans tenir compte de la composante horizontale de l'effort de coupe (F_x pour le tournage, F_h pour le fraisage) qui influe également d'une façon certaine sur les résultats d'usinage.

Ce qui vient d'être dit permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Les coefficients de précision doivent être calculés en fonction des conditions concrètes d'usinage.

2. Après la finition, les erreurs résiduelles sont infimes et donc négligeables.

3. Dans les calculs technologiques on est obligé de définir surtout les écarts de position résiduels. Les défauts de forme ne se calculent pas généralement, car il est rare qu'ils dépassent la tolérance prévue sur la cote à respecter ; ce calcul n'est effectué que dans des cas exceptionnels.

Le principe de la diminution des défauts de forme géométrique et l'application du coefficient de précision sont à la base de certaines méthodes de définition de la rigidité des machines-outils. Ces méthodes peuvent s'employer directement dans les conditions d'un atelier.

Sans s'attarder à la discussion de ces méthodes, notons qu'elles permettent d'établir la valeur totale de la rigidité d'un système élastique, alors que le calcul des refoulements se fait en partant des données sur la flexibilité de ses éléments isolés.

En plus des refoulements élastiques des organes du système machine-pièce-outil, les écarts de la cote à observer sont également fonction des erreurs produites par les défauts géométriques de la machine-outil et des défauts de son réglage.

La précision géométrique des machines-outils est définie par les normes nationales. Les erreurs admises lors de la fabrication des machines-outils augmentent au cours de l'exploitation ; aussi, les calculs doivent-ils tenir compte des valeurs des défauts non pas des machines nouvelles, mais de celles déjà exploitées. Ainsi, pour les tours à hauteur de pointes de 175 mm, le défaut de parallélisme admissible dans le plan horizontal entre l'axe de la broche et les glissières du bâti ne doit pas dépasser, sur une longueur de 300 mm, 0,01 mm pour des machines nouvelles et 0,02 mm pour des machines après une réparation capitale. Pour des machines nouvelles à hauteur de pointes importante, le défaut de parallélisme admissible dans le plan horizontal entre l'axe de la broche et les glissières du bâti est de 0,02 à 0,04 mm suivant la classe de précision de la machine. Ce défaut géométrique de la machine compromet la forme cylindrique de la surface usinée en la rendant conique. La différence entre les diamètres de la surface usinée est fonction de sa longueur et peut être calculée suivant la formule

$$\Delta r = \frac{c_t l_t}{L}$$

ou

$$\Delta d = 2\frac{c_t l_t}{L}, \qquad (53)$$

où Δr et Δd sont les accroissements respectifs du rayon et du diamètre de la surface usinée;

c_t, l'écart de parallélisme admissible entre l'axe de la broche et les glissières du bâti sur une longueur L (dans notre cas, $L = 300$ mm);

l_t, la longueur de la surface usinée en mm.

En usinage entre pointes, la conicité de la surface usinée peut être éliminée par dégauchissage correct de la contre-pointe; mais dans le cas d'un montage en l'air et serrage assez rigide de l'ébauche sur un mandrin ou une pince, la conicité est inévitable.

Le faux-rond de rotation admissible de la broche d'un tour résultant de l'ovalisation de ses portées ne doit pas dépasser, suivant les normes, les limites comprises entre 0,005 et 0,03 mm, en fonction de la classe de précision de la machine et la hauteur des pointes. Les portées d'une ébauche façonnée sur une telle machine enregistrent une ovalisation correspondante. Les deux défauts de forme (conicité et ovalisation) produisent un écart de la cote défini comme la somme arithmétique des écarts des cotes superposés résultant des défauts de forme.

Lors de l'exécution des plans sur une fraiseuse verticale, le défaut de parallélisme entre la surface portante de la table et les glissières longitudinales produit un écart de position qui se traduit par le défaut de parallélisme entre la surface usinée et la surface d'appui. La valeur de ce défaut est définie par la formule:

$$\Delta h = \frac{c_f l_f}{L}, \tag{54}$$

où Δh est l'accroissement de la hauteur de la surface usinée;

c_f, le défaut de parallélisme entre la surface portante de la table et les glissières longitudinales sur une longueur L;

l_f, la longueur de la surface usinée, mm.

Le défaut de perpendicularité entre l'axe de la broche et la surface de la table dans le sens longitudinal rend concave la surface usinée, défaut enregistré par la section perpendiculaire à l'avance (fig. 50).

Le calcul de la concavité définie par des liaisons géométriques donne des valeurs dépassant celle qui correspond au phénomène réel. Il en est ainsi parce que le calcul géométrique ne tient pas compte des refoulements de la tête de fraisage qui réduisent le défaut, et parce que l'inclinaison de l'axe de la broche varie pendant le fraisage par suite des erreurs des glissières de la table.

La concavité réelle ne dépasse pas 2 μ pour un diamètre de fraise de 200 mm et 5 μ, pour un diamètre allant jusqu'à 600 mm.

Les deux écarts (défaut de parallélisme entre la surface active de la table et les glissières longitudinales et celui de perpendicularité

dans le sens longitudinal entre l'axe de la broche et la surface active de la table) déterminent les défauts de la surface usinée et, donc, l'erreur de la cote à respecter, déterminée par la somme arithmétique des erreurs d'usinage résultant des écarts géométriques indiqués des organes de la machine.

D'autre part, les erreurs énoncées créent des écarts de position par rapport aux surfaces latérales et aux bouts de la pièce.

Les défauts géométriques des machines-outils se traduisent par des défauts de forme de la surface façonnée, ainsi que par des écarts de position de cette surface par rapport aux surfaces qui lui sont associées. Notamment, la conicité d'une surface cylindrique est à l'origine d'un défaut de perpendicularité entre sa génératrice et les bouts de la pièce; sur un tour, le défaut de perpendicularité admissible entre les glissières du chariot et l'axe de rotation de la broche produit une concavité de la surface dressée et compromet sa perpendicularité à l'axe de l'ébauche.

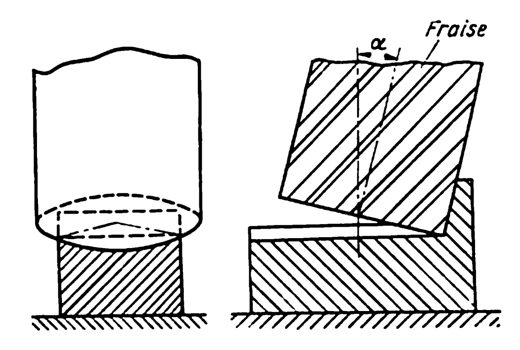


Fig. 50. Surface usinée concave résultant du défaut de perpendicularité entre l'axe de la broche et la surface de la table

Les écarts des cotes résultant des écarts de position et des défauts de forme sont définis à partir des liaisons géométriques par addition arithmétique, car ces écarts se superposent toujours.

Sous le terme de réglage de la machine à la cote on comprend le réglage de l'outil, des organes d'exécution de la machine et des éléments de repérage du montage qui leur communique une position assurant, compte tenu des phénomènes déclenchés par la coupe, l'exécution de la cote requise susceptible d'observer la tolérance imposée.

Cette position relative des éléments d'un système technologique est définie par le terme de *cote de position.*

Chaque nouveau réglage de la machine entraîne une erreur de réglage parce qu'il est impossible de rétablir avec précision la position relative des organes de la machine et de l'outil qui leur a été conférée par le réglage précédent; il est d'autant plus impossible de réaliser un réglage absolument identique de plusieurs machines chargées de la même opération.

La valeur du défaut de réglage ΔH est fonction de la méthode de réglage et comporte les défauts de la mise à la cote de l'outil, de la

mise en place du montage, des butées et d'autres éléments de réglage.

La mise à la cote de l'outil peut être effectuée au vernier ou à l'échelle, à l'étalon, au gabarit, à la pièce usinée, ou par d'autres méthodes qui déterminent chacune des erreurs de réglage différentes. Ces erreurs sont déterminées notamment par la valeur du trait du vernier, la précision de fabrication de l'étalon ou du gabarit, les variations du jeu entre le gabarit ou l'étalon et l'outil, les variations des cotes réelles des pièces usinées d'après lesquelles on effectue le réglage.

La méthode de réglage est choisie compte tenu des erreurs qu'elle peut produire et de la tolérance imposée à la cote à observer.

Lorsque l'exécution des cotes est assurée par des outils de précision (forets, alésoirs, etc.), les erreurs de réglage sont liées aux dimensions réelles de l'outil dont la précision est bien définie. Ainsi, à chaque remplacement de l'outil, les variations de la tolérance sur les diamètres des forets se traduiront par une altération de la précision d'usinage d'une manière analogue à l'action de l'erreur de réglage.

Le réglage de la machine-outil est lié au choix d'une valeur rationnelle de la cote de position, c'est-à-dire, comme nous l'avons déjà dit, de la cote qui définit, au moment du réglage, la position relative des organes d'exécution de la machine, du montage et de l'outil.

Sous le terme de la remise à la cote de position dite dans l'industrie « retouche de réglage » on comprend le rétablissement de la cote de position compromise par l'usure dimensionnelle de l'outil.

Pour déterminer la cote de position, il faut d'abord examiner le problème de l'interaction entre les cotes réelles des ébauches à une étape quelconque de leur usinage et les cotes réelles des surfaces exécutées par l'opération considérée.

Il a été établi en laboratoire que, dans l'obtention automatique des cotes, les surfaces aux cotes réelles maximales et minimales résultent de l'usinage des ébauches dont les cotes réelles respectives sont maximales ou minimales.

En effet, si la cote limite de l'ébauche est maximale, l'outil mis à la cote travaille avec une profondeur de coupe maximale p_{max}. Toutes les autres conditions étant les mêmes, on obtient alors dans le travail à l'outil un $F_{y_{max}}$; le système est donc le siège d'un refoulement maximal Y_{max}.

Si on désigne la cote de position par le symbole C_R, la formule de la cote de l'ébauche usinée (fig. 51) s'écrit

$$b_{max} = C_R + Y_{max}. \tag{55}$$

Pour la cote limite minimale de l'ébauche, la profondeur de coupe est minimale $p_{\min}$; il vient donc

$$F_{y_{\min}},\ Y_{\min} \text{ et } b_{\min}=C_R+Y_{\min}. \tag{56}$$

Il est clair que toutes les cotes réelles obtenues par usinage dans les limites comprises entre $b_{\min}$ et $b_{\max}$ sont associées aux cotes respectives des ébauches qui s'échelonnent de $a_{\min}$ à $a_{\max}$.

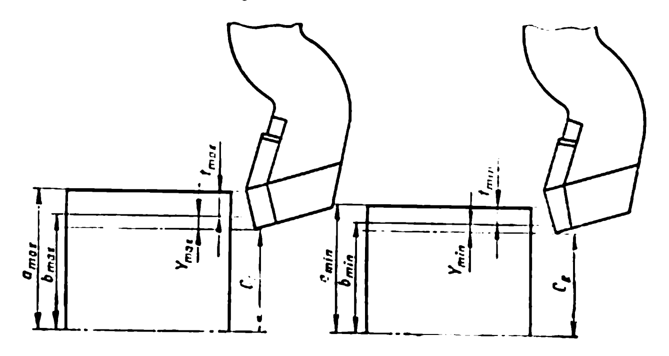


Fig. 51. Illustration du calcul de la cote de position pour l'usinage des surfaces extérieures

Ainsi, dans le cas de l'exécution des surfaces extérieures, la cote de position C_R augmente par suite des refoulements du système élastique machine-pièce-outil.

Mais si l'usinage des surfaces extérieures prévoit la mise à la cote de l'outil suivant la cote limite inférieure, la cote de position C_R peut diminuer par suite de l'erreur de réglage de la machine en entraînant la production du rebut suivant le côté « mini » du vérificateur. C'est pourquoi lors de l'exécution des surfaces extérieures, l'erreur de réglage effectué d'après la cote limite inférieure ne peut avoir lieu que dans le sens d'augmentation de la cote de position.

Il est clair qu'une cote de position vérifiant cette condition s'écrit

$$C_{R_{\min}}=b_{\min}-H_{\text{moy}}-Y_{\min}; \tag{57}$$

$$C_{R_{\max}}=b_{\min}-H_{\text{moy}}-Y_{\min}+\Delta H, \tag{58}$$

où Δ est l'erreur de réglage;

H_{moy}, la hauteur moyenne des rugosités (microgéométrie) de la surface taillée.

H_{moy} est introduit pour compenser le défaut de position des surfaces de référence lors de la mise à la cote (nez de l'outil) et de la mesure de la cote obtenue par usinage (crêtes et non pas creux du profil microgéométrique).

Il est clair que l'erreur admissible de réglage de la machine-outil est définie par la tolérance sur la cote à respecter ; plus le champ de la tolérance sur la cote à respecter est petit, plus l'erreur de réglage ΔH admissible doit être petite.

Si l'on tient compte d'une marge de sécurité, on peut poser approximativement que $\Delta H \approx 0{,}1\delta_b$, où δ_b est la tolérance sur la cote à respecter.

Pendant le réglage de la machine, les erreurs de mesure des ébauches usinées doivent également faire partie de l'erreur de réglage totale ΔH.

Pour le calcul de la cote de position $C_{R_{\min}}$, les grandeurs $b_{\min}$ et H_{moy} sont données, alors que la grandeur $Y_{\min}$ est fonction des conditions d'usinage. On prend donc d'abord une valeur approximative

$$C_R = b_{\min} - H_{moy}$$

pour calculer la profondeur de coupe instantanée

$$p_{ins} = a_{\min} - C_R ;$$

on trouve le refoulement instantané qui correspond à la profondeur de coupe instantanée :

$$Y_{ins} = AW_{syst} p_{ins}^x,$$

où

$$A = C_{y_{\min}} a^y H_B^n.$$

Le refoulement instantané diminue la profondeur de coupe jusqu'à

$$p_{\min} = p_{ins} - Y_{ins}.$$

Pour une profondeur de coupe $p_{\min}$,

$$Y_{\min} = AW_{syst} p_{\min}^x ;$$

la formule (57) donne

$$C_{R_{\min}} = b_{\min} - H_{moy} - Y_{\min}.$$

Vérifions si pour $C_{R_{\min}}$ ainsi établi la cote $b'_{\min}$ ne dépasse pas les limites imposées de $b_{\min}$:

$$p'_{ins} = a_{\min} - C_{R_{\min}} ;$$
$$Y'_{ins} = AW_{syst} p'^x_{ins} ;$$
$$p'_{\min} = p'_{ins} - Y'_{ins} ;$$
$$Y'_{\min} = AW_{syst} p'^x_{\min} ;$$
$$b'_{\min} = C_{R_{\min}} + H_{moy} + Y'_{\min} ; \qquad (59)$$

dans ces conditions la valeur calculée de b'_{min} doit être inférieure à la valeur imposée de b_{min}.

Calculons la valeur de

$$C_{R_{max}} = C_{R_{min}} + \Delta H ;$$

vérifions si la valeur calculée de b'_{max} ne dépasse pas les limites imposées à b_{max} :

$$p''_{ins} = a_{max} - C_{R_{max}} ;$$

$$A = C_{y_{max}} a^{y} H_B^{n} ;$$

$$Y''_{ins} = A W_{syst} p''^{x}_{ins} ;$$

$$p''_{max} = p''_{ins} - Y''_{ins} ;$$

$$Y''_{max} = A W_{syst} p''^{x}_{max} ;$$

$$b''_{max} = C_{R_{max}} + H_{moy} + Y''_{max} ; \quad (60)$$

la valeur calculée de b''_{max} devant être inférieure à celle imposée à b_{max}.

Le calcul des valeurs de Y_{min} et de Y_{max} se fait de la même façon que celui effectué pour un lot de pièces, c'est-à-dire en posant H_B = const.

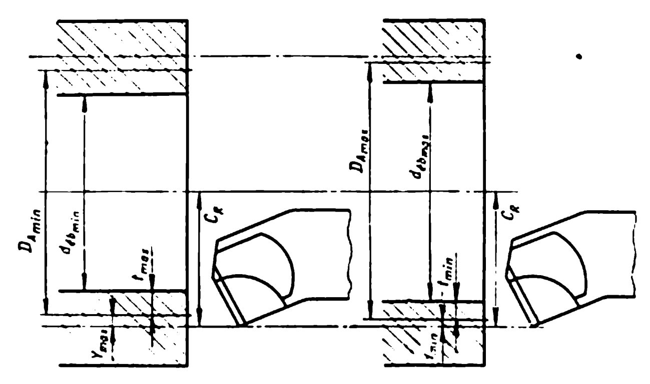


Fig. 52. Illustration du calcul de la cote de position pour l'exécution des alésages

Pratiquement, pour de faibles profondeurs de coupe on peut poser

$$C_{R_{min}} = b_{min} - H_{moy}$$

et vérifier directement les cotes obtenues b_{min} et b_{max}. Pour des profondeurs importantes, il faut s'en tenir au mode de calcul qui vient d'être exposé.

Lors de l'exécution des surfaces intérieures (alésages) à cote limite inférieure de l'ébauche $d_{éb_{min}}$ (fig. 52), l'outil mis à la cote coupe

à une profondeur maximale p_{max}. Dans ce cas pour le travail à l'outil on a $F_{y_{max}}$ et Y_{max}.

Pour une cote de position C_R, entre l'axe de rotation de l'ébauche et le nez de l'outil, on a

$$\frac{D_{A_{min}}}{2} = C_R - Y_{max}$$

ou

$$D_{A_{min}} = 2(C_R - Y_{max}). \quad (61)$$

Lorsque la cote limite $d_{éb_{max}}$ de l'ébauche est maximale, l'outil s'engage à une profondeur minimale p_{min}; dans ce cas on a $F_{y_{min}}$ et Y_{min}.

Pour la même cote de position C_R, on obtient

$$D_{A_{max}} = 2(C_R - Y_{min}). \quad (62)$$

Ainsi, lors de l'exécution des alésages, la cote de position est définie suivant les formules compte tenu de H_{moy}

$$C_{R_{max}} = \frac{D_{A_{max}}}{2} + H_{moy} + Y_{min} \quad (63)$$

et

$$C_{R_{min}} = \frac{D_{A_{max}}}{2} + H_{moy} + Y_{min} - \Delta H; \quad (64)$$

lors du façonnage unilatéral des surfaces intérieures, la cote de position est déterminée par les formules

$$C_{R_{max}} = b_{max} + H_{moy} + Y_{min} \quad (65)$$

et

$$C_{R_{min}} = b_{max} + H_{moy} + Y_{min} - \Delta H. \quad (66)$$

Ainsi, pour l'exécution des surfaces extérieures, la cote de position doit se rapprocher de la limite inférieure, et pour celle des surfaces intérieures, de la limite supérieure de la cote à respecter.

Le choix judicieux de la cote de position permet, d'une part, de prévenir le rebutage suivant le « mini » dès après réglage de la machine et assure, d'autre part, une meilleure utilisation de la zone de tolérance sur l'usure de l'outil; le nombre de retouches de réglage de la machine se trouve ainsi réduit pendant toute la période de la durée de l'outil.

En atelier, la valeur de la cote de position est définie sans recourir à l'étude détaillée des facteurs; on procède sur la base des données empiriques en la déplaçant d'un cinquième de la zone de tolérance dans le sens qui assure l'absence du rebut (fig. 53 et 54).

Ainsi, pour l'usinage des surfaces extérieures, le réglage de la machine doit être effectué à partir du niveau inférieur (fig. 53).

et pour l'usinage des surfaces intérieures, à partir du niveau supérieur (fig. 54).

Sur les figures 53 et 54, le signe Δ désigne la tolérance sur la cote à exécuter; A_1 et A_2, les niveaux de réglage de la machine. Les

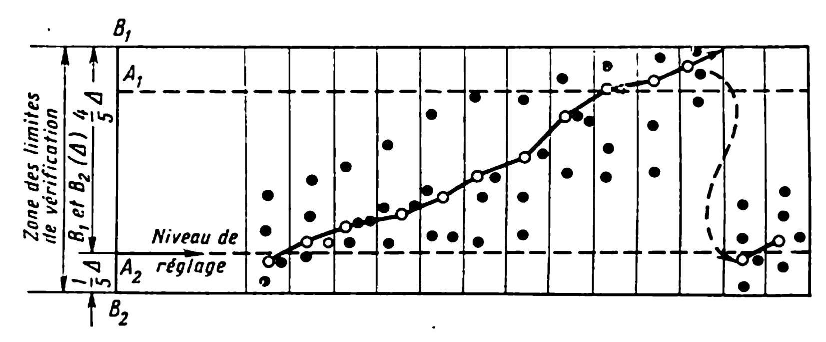


Fig. 53. Niveau du réglage et dispersion des cotes réelles en usinage des surfaces extérieures

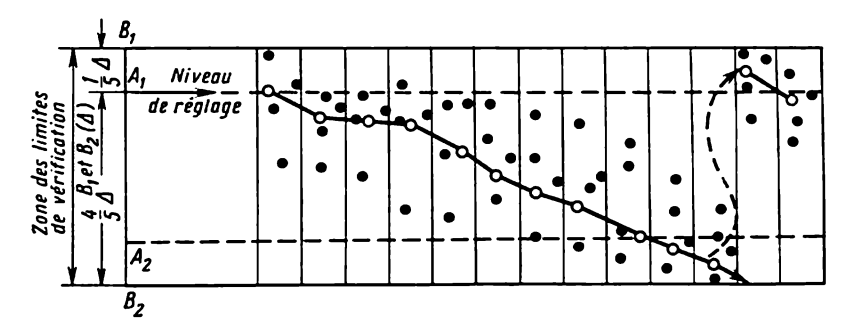


Fig. 54. Niveau du réglage et dispersion des cotes réelles en usinage des surfaces intérieures

courbes des figures 53 et 54 sont construites à partir de valeurs moyennes des mesures définissant les cotes réelles d'usinage avec une précision plus poussée que les mesures unitaires.

C. Usure dimensionnelle des outils. Action des déformations thermiques des organes d'un système technologique sur les cotes à respecter

L'*usure dimensionnelle des outils* produit une erreur qui change progressivement de valeur au cours de l'usinage d'un lot d'ébauches.

L'usure des outils de coupe est définie par plusieurs facteurs; ce sont notamment la matière d'œuvre, le matériau de l'outil, sa

construction, la géométrie de la partie active et ses dimensions, le traitement thermique de la partie active, la rugosité de l'arête tranchante, la vitesse de coupe, la nature et le débit du liquide d'arrosage, etc.

Les cas sont nombreux où l'usure dimensionnelle est importante et il faut en tenir compte, car elle compromet nettement la précision d'usinage.

Les travaux de recherche montrent que l'usure dimensionnelle u n'est pas proportionnelle à l'usure de la surface en dépouille h;

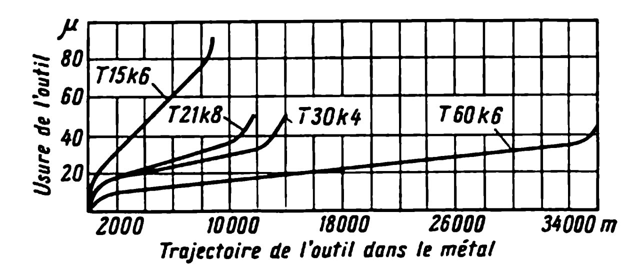


Fig. 55. Relation entre l'usure dimensionnelle et la trajectoire de l'outil dans le métal

l'utilisation de la formule $u = h \operatorname{tg} \alpha$ pour le calcul de l'usure dimensionnelle conduit à une erreur importante inadmissible. Il en est ainsi parce que l'usure dimensionnelle ne dépend de l'usure de la surface en dépouille que dans le secteur adjacent au nez de l'outil, mais non pas dans le secteur de l'arête de coupe latérale où l'on mesure ordinairement l'usure de la surface en dépouille h. Cette circonstance ainsi que le déplacement continu du point de contact de l'arête tranchante avec la surface façonnée obligent à définir l'usure dimensionnelle de l'outil par des méthodes expérimentales.

La figure 55 matérialise la relation entre l'usure dimensionnelle et la trajectoire de l'outil dans le métal; cette relation a été établie lors d'un tournage fin avec des outils à plaquettes rapportées en carbures durs des nuances notées sur le graphique. Chaque courbe d'usure compte trois secteurs: le premier définit une usure dimensionnelle intense par suite du rodage du tranchant; le deuxième, une usure dimensionnelle réduite caractéristique des conditions considérées; le troisième, une accélération intense de l'usure qui aboutit à la destruction de l'arête.

La loi linéaire d'usure dimensionnelle du deuxième secteur (le plus long) s'observe en usinage avec des outils variés; on peut donc poser que l'usure dimensionnelle est définie par l'usure relative ou

spécifique enregistrée sur 1 000 m de longueur de coupe

$$u_0 = \frac{1000u}{l}, \tag{67}$$

où u_0 est l'usure dimensionnelle spécifique en μ pour 1 000 m de longueur de coupe;
u, l'usure dimensionnelle spécifique en μ pour la longueur qui correspond au deuxième secteur de la courbe de l'usure;
l, la longueur de coupe en m qui correspond au deuxième secteur de la courbe.

Cette formule permet de déduire

$$u = \frac{l}{1000} \cdot u_0; \tag{68}$$

la formule (68) ne tient pas compte de l'usure intense pendant la période de rodage du tranchant ; on peut poser avec une précision suffisante pour des buts pratiques

$$u = \frac{L}{1000} \cdot u_0 = \frac{l + l_i}{1000} \cdot u_0, \tag{69}$$

où L est la longueur totale de coupe, c'est-à-dire $L = l + l_i$;
l_i, la longueur de coupe qui correspond à l'usure initiale de l'outil. Avec une précision suffisante pour des buts pratiques on prend pour tous les calculs $l_i = 1\,000$ m.

En tournage de finition avec des outils en carbures durs, l'usure spécifique varie de 3 à 10 μ pour 1 000 m de longueur de coupe en fonction de la nuance du carbure, de la vitesse de coupe et des propriétés de la matière d'œuvre.

Pour le tournage, le régime de coupe étant défini, la longueur de coupe l est donnée par les formules

$$l = vt_m$$

ou

$$l = \frac{\pi D}{1000} \cdot \frac{L}{a},$$

où l est la longueur de coupe, m;
D, le diamètre de la surface usinée, mm;
L, la longueur de la surface usinée, mm;
a, l'avance, mm/tr.

Pour les conditions d'usinage considérées, l'usure dimensionnelle admissible de l'outil est choisie en fonction de la tolérance sur la cote à respecter.

L'usure dimensionnelle $u \approx 0{,}4\,\delta$ (où δ est la tolérance sur la cote). Il convient pourtant de prendre en considération le fait que l'usinage des surfaces de révolution double l'erreur de la cote à réa-

liser (par rapport à la valeur de l'usure de l'outil, c'est-à-dire $\Delta u = 2\ u$) par suite de l'usure dimensionnelle de l'outil ; on est donc astreint parfois à limiter l'usure dimensionnelle admissible de l'outil à une valeur inférieure à 0,4 δ.

Dans les expériences montées par l'auteur, l'usure dimensionnelle de l'outil atteignait 250 μ en dégrossissage. Il n'est pas recommandé de choisir une usure dimensionnelle plus importante, même en dégrossissage, car l'usure simultanée produite par le travail de l'outil dans les conditions d'un régime défini altère nettement ses propriétés de coupe pendant cette période de la tenue dimensionnelle.

En usinage de précision l'usure dimensionnelle atteint dans certains cas la moitié de la tolérance, lorsque les dimensions sont très petites (dans l'exécution de l'alésage des trous de 1 à 3 mm de diamètre, par exemple), et environ un quart de la tolérance, lorsque les dimensions sont plutôt importantes (cas de l'alésage des trous de 120 à 180 mm de diamètre, par exemple).

En étudiant les causes des erreurs de fabrication et, notamment, l'usure dimensionnelle de l'outil, il faut dire également que pendant le façonnage des ébauches sur des machines-outils le régime thermique du système technologique machine-pièce-outil ne reste pas constant. Les variations du régime thermique engendrent des déformations thermiques des organes du système, qui compromettent leur position relative et la mise à la cote de l'outil ; la déformation thermique de l'ébauche change la profondeur de coupe et, donc, l'effort de coupe. Ainsi, les déformations thermiques influent d'une façon définie sur la précision d'usinage, surtout au début, lorsque la machine est lancée après une longue interruption. Après un certain temps, l'équilibre thermique est acquis et les déformations thermiques deviennent plus ou moins constantes.

On sait que la valeur de la déformation thermique peut être calculée d'après la formule

$$\Delta_t = \alpha L (\vartheta_f - \vartheta_i), \tag{70}$$

où Δ_t est la valeur de la déformation thermique ;
α, le coefficient de dilatation linéaire du matériau ;
L, la cote de l'élément d'après lequel on calcule le déplacement ;
ϑ_f, la température finale ;
ϑ_i, la température initiale.

Toutefois, les résultats que permet d'obtenir cette formule diffèrent nettement des valeurs réelles. Ainsi, pour $\alpha = 11 \cdot 10^{-6}$ (fonte), $L = 385$ mm (hauteur de pointes), $\vartheta_f = 43°$ et $\vartheta_i = 23°$, le déplacement vertical de l'axe de la broche $\Delta_t = 0{,}085$ mm, alors que son déplacement réel n'était que de 0,045 mm ; dans les mêmes conditions, mais pour $L = 185$ mm (distance des glissières prismatiques à l'axe de la broche), la formule (70) donne $\Delta_t = 0{,}041$ mm, alors que le

déplacement réel de la broche ne dépasse pas 0,011 mm. Un écart aussi important entre les valeurs calculées et réelles des déformations thermiques indique qu'il existe plusieurs facteurs dont on n'a pas tenu compte; tels sont la construction du corps de la poupée, son mode de fixation sur la machine, son échauffement irrégulier, etc. La grandeur des déformations thermiques de la machine est fonction du temps de son fonctionnement continu et de la vitesse de rotation de la broche. Ainsi, l'allongement thermique Δ_t en μ de la broche d'une fraiseuse changeait suivant la durée de fonctionnement continu de la machine T et du nombre de tours n de la broche de la manière suivante:

Temps de travail de la machine T, mn	20	40	60
Δ_t, μ pour $n = 390$ tr/mn	17	19	20
Δ_t, μ pour $n = 765$ tr/mn	22	27	32

Ainsi, les résultats du calcul des déformations thermiques des organes d'une machine ne sont pas assez sûrs pour qu'ils puissent trouver une application pratique; il en est de même pour le régime thermique d'une ébauche usinée qui ne peut pas être défini avec une précision suffisante. Il a été établi en laboratoire que la température de l'ébauche diminue avec l'augmentation de la vitesse de coupe; elle diminue également lorsque l'avance s'accroît (à l'exception de la gamme de ses plus faibles valeurs).

L'augmentation de la profondeur de coupe élève la température de l'ébauche.

Dans les mêmes conditions, les déformations thermiques de l'ébauche sont d'autant plus faibles que la pièce est plus grosse.

Les déformations thermiques sont les plus importantes dans le cas des pièces à parois minces usinées avec une grande profondeur de coupe.

Au début du travail, l'allongement thermique de l'outil augmente rapidement pour s'amortir brusquement et se stabiliser. L'allongement de l'outil s'accroît avec l'augmentation de la vitesse de coupe, de l'avance, de la profondeur de coupe et du porte-à-faux de l'outil. L'augmentation de la section de l'outil et de l'épaisseur des plaquettes en carbure dur réduit nettement l'allongement thermique.

L'allongement thermique de l'outil est très influencé par la charge de rupture σ_r du matériau usiné; dans le cas d'usinage des aciers de nuances variées, l'allongement thermique de l'outil augmente presque proportionnellement à la valeur de σ_r.

Il semble que les résultats des calculs usuels de l'allongement λ de l'outil d'après la formule

$$\lambda = \alpha \Delta \vartheta L \qquad (70,a)$$

ne peuvent pas être appliqués en pratique par suite de l'échauffement irrégulier du corps de l'outil suivant sa longueur et de l'éva-

cuation de la chaleur par les éléments du porte-outil. L'allongement calculé est en fait bien supérieur à la déformation réelle de l'outil ou de la dent d'une fraise. Il n'existe pas encore de modes de calcul assez sûrs, car la coupe s'accompagne de phénomènes très compliqués et, en l'occurence, de l'interaction des flux thermiques qui diffèrent par leur intensité, leur durée, leur variabilité. Des causes nombreuses et variées, n'ayant souvent aucune relation entre elles, rendent difficile l'obtention des renseignements pratiques sur l'allongement thermique des outils.

Les considérations qui viennent d'être exposées montrent que les phénomènes thermiques du système technologique machine-pièce-outil sont très compliqués, et leur action sur la précision d'usinage est peu étudiée.

Il existe des mesures établies par la pratique qui permettent de réduire l'action néfaste des déformations thermiques sur la réalisation des cotes. L'emploi des huiles de coupe diminue sensiblement l'action des déformations thermiques du système et surtout de l'outil.

Le dégrossissage produit un échauffement important ; c'est pourquoi il n'est pas d'usage de s'attaquer à la finition dès après le dégrossissage, car après le refroidissement, la cote réelle de l'ébauche peut dépasser alors les limites imposées par la tolérance inférieure.

L'échauffement d'une ébauche usinée produit des déformations, car sa dilatation libre est interdite par le serrage ; ces déformations peuvent entraîner des erreurs d'usinage inadmissibles. Il ne faut pas oublier non plus que pendant l'usinage, pour ne pas fausser les mesures, ces dernières ne doivent pas être effectuées sur une pièce chaude.

Pour réduire l'influence de l'allongement thermique de l'outil, la coupe doit se faire avec des intervalles. Les déformations thermiques de l'outil augmentent alors pendant l'usinage des premières pièces, puis se stabilisent sans atteindre des valeurs importantes.

Fait à noter également, que l'influence des déformations thermiques peut dans de nombreux cas être compensée par l'usure de l'outil mis à la cote.

Les déformations thermiques des organes de la machine importent également surtout dans la première période de service, après quoi elles diminuent et se stabilisent.

La stabilisation des déformations thermiques produit une erreur qui reste constante tout au long de l'exécution du lot de pièces considérées et dont la cote de position peut en rendre compte.

En usinage de précision (rectification fine, alésage fin), pour parer à l'influence des erreurs thermiques jusqu'au moment de la stabilisation de leur valeur, avant de s'attaquer aux pièces on réchauffe la machine en marche à vide. Pour prévenir la formation éventuelle des irrégularités à la surface des dents des engrenages au

diamètre important, dues aux déformations thermiques du système machine-pièce-outil, le taillage complet des engrenages se fait sans arrêter la machine même si l'opération se poursuit pendant plusieurs relèves. Dans la plupart des cas il n'est point besoin de tenir compte des déformations thermiques, car si l'on prend toutes les précautions, leur part dans l'erreur d'usinage totale est relativement faible.

D. Calcul de l'erreur d'usinage totale (résultante)

En terminant l'étude des causes à l'origine des erreurs d'usinage sur des machines-outils réglées à l'avance, une conclusion s'impose: la tolérance pratique sur la cote à respecter est constituée des erreurs qui apparaissent en service et qui sont dues à plusieurs facteurs, dont:

1. Les variations de l'effort de coupe résultant des modifications de la tranche cisaillée, des écarts dans les propriétés mécaniques du métal d'œuvre de divers lots d'ébauches de même dimension type et de l'émoussage de l'outil; cette erreur est définie par l'expression

$$\Delta Y = Y_{max} - Y_{min} = F_{y_{max}} W_{max} = F_{y_{min}} W_{min} ;$$

la valeur de ΔY caractérise la différence limite des refoulements et, donc, les variations respectives de la cote.

Lors de l'usinage de plusieurs lots d'ébauches de même dimension type, on obtient

$$F_{y_{max}} = C_{y_{max}} p^x_{max} a^y H_{B_{max}} ;$$

$$F_{y_{min}} = C_{y_{min}} p^x_{min} a^y H^n_{B_{min}},$$

où $H_{B_{max}}$ et $H_{B_{min}}$ sont les valeurs limites de la dureté établies par le cahier des charges pour le métal d'œuvre; lors de l'usinage d'un lot d'ébauches, on peut négliger les écarts de dureté et prendre la grandeur moyenne de la dureté d'un lot; alors

$$F_{y_{max}} = C_{y_{max}} p^x_{max} a^y H^n_B ;$$

$$F_{y_{min}} = C_{y_{min}} p^x_{min} a^y H^n_B .$$

2. Les écarts de la cote $\Sigma\Delta_m$ résultant du défaut de forme de la surface usinée dû aux défauts géométriques de la machine. Du fait que les défauts de forme d'une surface sont généralement produits par *plusieurs* défauts géométriques de la machine et se superposent inévitablement, cette composante de la tolérance sur la cote à observer est définie comme la somme arithmétique des écarts maximaux de la cote résultant des défauts de forme. Cette erreur s'additionne arithmétiquement aux erreurs d'autres types.

3. L'erreur de réglage de la machine ΔH. Le réglage de la machine restant le même, cette erreur est constante pour l'exécution de tout le lot d'ébauches. L'erreur de réglage ne doit pas dépasser la valeur prévue pour l'usinage de un ou de plusieurs lots d'ébauches.

4. L'usure dimensionnelle Δu, qui change régulièrement au cours de la durée de l'outil. L'erreur produite par l'usure ne doit pas être supérieure à la limite établie.

5. L'erreur de mise en place lorsqu'elle influe directement sur la cote à obtenir; dans ce cas, comme nous l'avons déjà dit, l'erreur de mise en place est définie par la somme arithmétique donnée par la formule (10):

$$\varepsilon_m = \varepsilon_p + \varepsilon_s$$

et représente la différence entre les distances limites entre la surface de référence et l'outil mis à la cote.

6. Les déformations thermiques des éléments du système technologique $\Sigma \Delta T$, dirigées suivant la normale à la surface usinée. Ces déformations thermiques peuvent se superposer ou se compenser plus ou moins en fonction de la valeur et de la direction des déformations. C'est pourquoi la résultante des défauts d'usinage produite par les déformations thermiques est définie par une somme algébrique (compte tenu du signe).

On peut donc écrire:

$$\delta \approx \Delta Y + \sum \Delta_m + \Delta H + \Delta u + \varepsilon_m + \sum \Delta T, \qquad (71)$$

où δ est la tolérance sur la cote à respecter;

ΔY, la différence limite des refoulements résultant de l'instabilité de l'effort de coupe;

$\Sigma \Delta_m$, la somme arithmétique des écarts dimensionnels résultant des défauts de forme de la surface usinée, produits par les erreurs géométriques de la machine;

ΔH, l'erreur de la cote résultant de l'erreur régulière du réglage de la machine;

Δu, l'accroissement de la cote à exécuter par suite de l'usure dimensionnelle de l'outil;

ε_m, le défaut de mise en place de l'ébauche pour son usinage sur une machine-outil;

$\Sigma \Delta T$, la somme algébrique des écarts dimensionnels dus aux déformations thermiques des éléments du système technologique, dirigées suivant la normale à la surface usinée.

Puisqu'il n'existe pas de méthode rigoureuse pour le calcul des déformations thermiques, on est obligé de prendre la composante $\Sigma \Delta T$ dans la formule de la tolérance sur la cote à observer sous sa forme générale sans indiquer aucune recommandation ou norme.

Les recherches entreprises dans le domaine de la précision permettent d'en déduire que, même dans les conditions d'usinage les plus défavorables (pièces à parois minces, régime pénible, mauvais refroidissement), l'erreur produite par les déformations thermiques ne dépasse pas 15 % de la somme des autres composantes de la tolérance.

Ainsi, lorsque la tolérance est calculée sans la composante $\Sigma \Delta T$, nous commettons une erreur de calcul supplémentaire.

La formule (71) est vérifiée pour l'enlèvement unilatéral du copeau.

Si le défaut de la mise en place n'a pas lieu ($\varepsilon_m = 0$), la formule (71) s'écrit

$$\delta \approx \Delta Y + \sum \Delta_m + \Delta H + \Delta u + \sum \Delta T. \qquad (72)$$

Lors du façonnage des surfaces de révolution extérieures et intérieures (tournage, alésage), ainsi que de l'usinage simultané des plans opposés (dressage des bouts par outils multiples, fraisage simultané des plans opposés), comme nous le savons déjà (voir fig. 22), l'erreur de mise en place n'influe pas sur la cote à réaliser.

Toutes les composantes de la tolérance définissent l'erreur suivant le rayon (dans l'usinage des surfaces de révolution) ou par côté (dans le taillage simultané des plans opposés) ; c'est pourquoi lorsqu'il s'agit d'un diamètre ou d'une cote établie entre des plans parallèles, les composantes de la tolérance doivent être doublées. La formule (71) s'écrit pour ces cas :

$$\delta \approx 2\,(\Delta Y + \sum \Delta_m + \Delta H + \Delta u + \sum \Delta T). \qquad (73)$$

Les expériences montées pour vérifier les formules (71) et (72) ont révélé que les valeurs des défauts d'usinage réelle et calculée coïncident. Lors du dressage simultané des bouts avec la mise en place de l'ébauche entre pointes rigides (voir fig. 20), la tolérance de la cote a est calculée d'après la formule (73), car le défaut de la mise en place n'influe pas sur la tolérance de la cote a; par contre il influe sur la tolérance de la cote b qui associe les épaulements dressés des fusées au bout de l'arbre; c'est pourquoi la tolérance de la cote b est définie par la formule (71).

Lors de la mise en place avec une pointe à ressort et le positionnement suivant le bout de l'arbre (voir fig. 22), c'est-à-dire lorsque la surface d'appui et la surface de référence se confondent, le défaut de la mise en place n'a pas lieu et les tolérances des cotes a et b sont définies par les formules (73) et (72).

Dans le cas de petites cotes des surfaces usinées il est avantageux de simplifier les calculs, en rejetant les composantes dues aux défauts géométriques de la machine. On peut, par exemple, ne pas tenir compte du défaut de perpendicularité des fusées des arbres lorsque la différence entre les diamètres est faible.

L'exécution des trous avec des outils de précision (perçage, fraisage, alésage, brochage) produit l'élargissement des trous, c'est-à-dire donne lieu à une différence entre les diamètres du trou réalisé et de l'outil. L'élargissement des trous compromet nettement la précision d'usinage.

Les hypothèses en cours donnent des explications différentes de ce phénomène.

Certains chercheurs considèrent que la cause première de l'élargissement du trou réside dans la formation d'une arête rapportée à la surface d'attaque du cône actif de l'outil, qui augmente le diamètre du trou et dégrade l'état de surface.

Pourtant d'autres chercheurs ne sont pas d'accord avec cette explication, car ils ont établi expérimentalement qu'avec l'émoussage de l'alésoir l'arête rapportée grossit alors que le diamètre et l'état de surface des trous restent à peu près les mêmes.

D'autres encore avancent l'hypothèse suivant laquelle l'élargissement est dû à la poussière métallique produite par la coupe et qui exerce une action abrasive sur la surface usinée.

Cette façon de voir appelle également des objections, car la dureté de la poussière métallique et de la surface usinée, écrouie par les goujures de l'outil, est à peu près du même ordre, alors que la dureté des goujures est supérieure à celle de la poussière métallique, et celle-ci n'est donc pas capable de s'y incruster; ainsi, une action abrasive doit être exclue.

On considère que l'élargissement des trous résulte de l'usure de la surface du trou produite par les goujures dont la faible largeur et le petit jeu rendent impossible la formation d'un film lubrifiant entre les surfaces du trou et des goujures qui travaillent ainsi dans les conditions d'un frottement limite (demi-sec). La poussière métallique est donc le produit de l'usure, elle est une conséquence et non pas une cause de l'élargissement du trou.

Cette hypothèse autorise à considérer que l'ovalisation et la conicité des trous percés résultent du gauchissement des axes de l'outil et de l'avant-trou. Dans ces conditions on admet que la conicité et l'ovalisation sont produites par l'usure locale accélérée due aux pressions spécifiques élevées exercées par les goujures de l'outil suivant la normale à la surface usinée.

Dans les ouvrages publiés par la chaire de technologie de la construction mécaniqne de l'Ecole technique supérieure Bauman de Moscou les auteurs expriment l'opinion que l'élargissement des trous est dû aux défauts géométriques de la machine et de l'outil. Le défaut de perpendicularité entre la surface de la table et l'axe de rotation de la broche d'une perceuse, notamment, provoque l'écartement de l'axe du trou ; dans ces conditions (fig. 56)

$$y_t = y_g + y_d,$$

où y_t est l'écartement de l'axe du trou ;
y_g, l'écartement géométrique dû au défaut de perpendicularité entre la surface de la table et l'axe de la broche ;
y_d, l'écartement dynamique produit par l'action sur le foret de la résultante des composantes radiales de l'effort de coupe (normale à la surface usinée).

L'écartement provoque le gauchissement des axes du foret et du trou, ce qui entraîne une augmentation locale des pressions spécifiques normales à la surface usinée, et donc accroît le défaut géométrique de la forme du trou.

Par ailleurs, le battement radial de l'axe de la broche ainsi que l'écart entre l'axe du logement conique de la broche et l'axe de sa rotation peuvent être également considérés comme les causes de l'élargissement du trou.

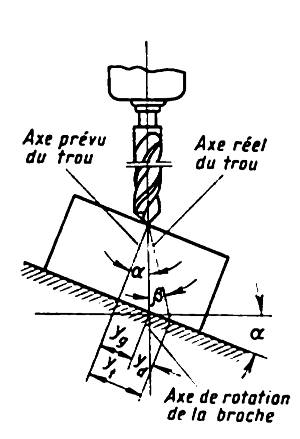


Fig. 56. Ecartement de l'axe d'un trou par suite du défaut de perpendicularité de la surface de la table d'une perceuse par rapport à l'axe de rotation de la broche

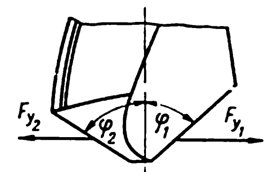


Fig. 57. Différence des angles entre les arêtes de coupe et l'axe du foret

Un affûtage défectueux qui compromet l'égalité des demi-angles de pointe du foret φ_1 et φ_2 (angles entre l'arête de coupe et l'axe du foret) rend les longueurs des arêtes de coupe différentes (fig. 57) ; une résultante des forces radiales apparaît alors qui change de direction pendant la rotation du foret et le serre contre les parois du trou en entraînant l'élargissement de ce trou ; dans ces conditions la résultante des forces radiales s'écrit

$$\Delta F_r = F_{y_2} - F_{y_1}.$$

L'inégalité des rayons des dents d'un foret aléseur produit également une résultante des forces normales à la surface usinée ; la rotation change la direction de cette résultante et le trou se trouve ainsi élargi.

Il semble que l'examen des phénomènes isolés ne suffit pas pour expliquer l'élargissement du trou et il faut passer en revue l'ensemble des facteurs engagés.

La tolérance sur la cote est définie non pas par la valeur absolue de l'élargissement du trou, mais par la différence entre les valeurs limites de cet élargissement.

Les variations de celui-ci sont inévitables et voici pourquoi.

Les ébauches de plusieurs lots ne peuvent pas être usinées par le même outil, il faut le changer; or, les diamètres varient d'un outil à l'autre dans les limites de la tolérance de fabrication. D'autre part, les outils employés ne sont pas tous nouveaux, il y en a qui ont déjà servi et qui ont été réaffûtés. Chaque affûtage diminue le diamètre de l'outil par suite de sa conicité inverse. Pour augmenter la durée de service des forets et des forets aléseurs, ainsi que pour parer au grippage éventuel de l'outil dans le trou, on diminue leur diamètre en fonction du diamètre de l'outil et dans la direction de la queue à raison de 30 à 100 μ par 100 mm de longueur du corps. La longueur du cône inverse d'un alésoir est égale à 0,25 ou 0,5 de la longueur du guidage. Sous le terme d'usure dimensionnelle de l'outil on comprend non pas la diminution de son diamètre pendant l'usinage d'un lot d'ébauches, mais la diminution générale du diamètre de l'outil par suite de son usure et de son affûtage établie à partir de données expérimentales, égale environ à $^1/_3$ de la tolérance sur la cote à respecter du trou.

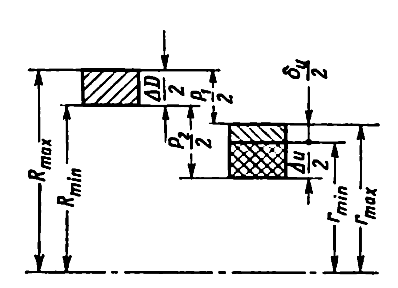


Fig. 58. Illustration du calcul du défaut d'exécution d'un trou par un outil axial

Ainsi, la tolérance sur les diamètres des trous usinés, les diamètres limites de l'outil et son usure dimensionnelle admissible sont liés réciproquement.

En désignant par

R_{max} et R_{min}, les rayons limites maximal et minimal des trous usinés;

r_{max} et r_{min}, les rayons limites maximal et minimal des outils employés pour l'usinage;

Δu, l'usure dimensionnelle admissible de l'outil, calculée à partir de sa cote limite inférieure;

δ_u, la tolérance du diamètre de l'outil;

p_1 et p_2, les valeurs limites de l'élargissement du trou relatives aux cotes maximale et minimale de l'outil (compte tenu de l'usure), on obtient (fig. 58)

$$R_{max} = r_{max} + \frac{p_1}{2};$$

$$R_{min} = r_{min} - \frac{\Delta u}{2} + \frac{p_2}{2},$$

d'où

$$R_{max} - R_{min} = r_{max} + \frac{p_1}{2} - r_{min} + \frac{\Delta u}{2} - \frac{p_2}{2}$$

ou

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{\delta_u}{2} + \frac{p_1 - p_2}{2} + \frac{\Delta u}{2}.$$

En désignant la différence des valeurs limites de l'élargissement des trous pour un ensemble de plusieurs lots d'ébauches par

$$p_1 - p_2 = \Delta p,$$

on obtient

$$\frac{\Delta D}{2} = \frac{\delta_u}{2} + \frac{\Delta p}{2} + \frac{\Delta u}{2}$$

ou

$$\Delta D = \delta_u + \Delta p + \Delta u.$$

En passant de l'erreur de la cote réalisée à la tolérance sur le diamètre du trou, notons que cette tolérance δ_D doit être égale ou supérieure à l'erreur obtenue ΔD, c'est-à-dire

$$\delta_D \geqslant \delta_u + \Delta p + \Delta u.$$

Les valeurs limites de l'élargissement au début et à la fin de l'usinage d'un ensemble de lots d'ébauches peuvent être :

$$1)\ p_1 > p_2\ ; \quad 2)\ p_1 = p_2\ ; \quad 3)\ p_1 < p_2.$$

Dans le premier cas, ΔF est une grandeur positive $(+\Delta F)$ et

$$\delta'_D \geqslant \delta_u + \Delta p + \Delta u\ ; \qquad (74)$$

dans le deuxième cas $\Delta F = 0$ et

$$\delta''_D \geqslant \delta_u + \Delta u\ ; \qquad (75)$$

dans le troisième cas ΔF est une grandeur négative $(-\Delta F)$ et donc

$$\delta'''_D \geqslant \delta_u - \Delta p + \Delta u. \qquad (76)$$

En présence des défauts géométriques de forme (ovalisation et conicité), les valeurs limites de l'élargissement des trous sont définies par la différence entre la cote maximale du trou et la cote correspondante de l'outil, c'est-à-dire du plus grand d_{max} pour p_1 et du plus petit $(d_{min} - \Delta u)$ pour p_2.

Les formules (74) à (76) rendent évident le fait que :

1) la tolérance de la cote du trou est définie non pas par l'élargissement du trou mais par la différence entre les valeurs limites de cet élargissement ;

2) si les valeurs limites de l'élargissement sont égales, elles n'exercent aucune action sur la tolérance ;

3) la tolérance minimale correspond à $p_1 < p_2$; mais comme il est impossible de prévoir à l'avance les rapports entre les valeurs limites de l'élargissement, il faut prendre suivant la formule (74) la valeur maximale de la tolérance.

Dans plusieurs cas, l'élargissement du trou est négatif, c'est-à-dire que l'on obtient un trou dont le diamètre est inférieur à celui de l'outil.

Le rétrécissement du trou est dû évidemment aux déformations thermiques de l'ébauche et de l'outil (au refroidissement, le retrait du trou est plus fort que celui de l'outil) et au rétablissement élastique du métal de l'ébauche après l'action de l'outil (rétablissement élastique supérieur à la différence entre les diamètres du trou et de l'outil, différence qui existait pendant la coupe). Toutefois le rétrécissement ne modifie d'aucune façon les conclusions qui s'imposent sur le défaut d'usinage. La différence entre les valeurs $(-p_1)$ et $(-p_2)$ peut être la même en valeur absolue, quel que soit le signe.

C'est pourquoi en optant pour une telle conclusion et en posant

$$p_2 - p_1 = \Delta p,$$

on obtient

$$\Delta_D = \delta_u + \Delta u + \Delta p,$$

c'est-à-dire la même relation que pour un élargissement avec cette seule différence que pour le rétrécissement la plus petite tolérance correspond au cas de $p_1 > p_2$, car nous avons alors une différence négative des valeurs limites de l'élargissement $(-\Delta p)$, alors que pour un élargissement, la différence négative de ses valeurs limites correspond au cas de $p_1 < p_2$; pourtant, puisque dans le cas du rétrécissement il est impossible de prévoir la relation entre les valeurs limites de la modification du trou, il faut poser

$$\delta_D \geqslant \delta_u + \Delta p + \Delta u,$$

c'est-à-dire la relation donnée par la formule (74).

Des considérations exposées plus haut dont on déduit que Δp associe la valeur double de $(\Delta Y + \Sigma \Delta_m + \Sigma \Delta T)$, alors que δ_u remplace la valeur double de ΔH dans la formule (73), il est fort à propos de noter que les formules (73) et (74) sont identiques.

Les procédés de façonnage fin, et souvent la finition, étant appliqués en fin de gamme d'usinage, les tolérances sur les cotes que ces procédés permettent d'obtenir doivent correspondre aux classes de précision définies par les normes. Aussi, les valeurs approchées des tolérances obtenues par calcul doivent être arrondies pour correspondre aux valeurs normalisées les plus proches. En dégrossissage et en semi-finition, la question qu'il faut résoudre généralement n'est pas celle de la précision à atteindre, mais celle de la valeur

rationnelle de la tolérance de fabrication imposée qui assurerait un usinage de qualité avec un nombre minimal de retouches de réglage.

Il est donc logique de réduire également les tolérances de fabrication imposées à l'ébauche aux tolérances normalisées les plus proches, car dans ce cas la liste des calibres nécessairement disponibles diminue nettement.

Les tolérances des cotes des pièces finies sont établies par les normes d'Etat sur la base des ajustements respectifs et sont liées par une relation définie avec les cotes diamétrales indépendamment de la longueur de la pièce. Les tolérances de fabrication ne dépendent pas directement du diamètre, et d'une manière générale de la cote transversale; cette relation est indirecte du fait que plus la pièce brute est grosse, plus les défauts de fabrication sont importants. La rigidité de l'ébauche influe beaucoup plus sur la précision d'usinage que la cote transversale.

Cet énoncé a été vérifié par l'expérience montée au laboratoire de technologie de la construction mécanique de l'Ecole supérieure technique de Moscou pour l'usinage des ébauches rigides d'un diamètre de 36 à 182 mm. L'ébauchage a corrigé les défauts des pièces brutes; le façonnage expérimental s'effectuait aux mêmes régimes de coupe ($p = 0{,}5$ mm, $a = 0{,}3$ mm/tr; $v = 55 \div 56$ m/mn) et autres conditions identiques. L'expérience a enregistré des écarts allant de 84 à 96 μ (en moyenne 90 μ) pour des ébauches de 182 mm de diamètre, et de 72 à 102 μ (en moyenne 87 μ) pour des ébauches de 36 mm de diamètre; les écarts de toutes les cotes intermédiaires étaient compris dans les mêmes limites.

Ainsi, après la correction par ébauchage des pièces brutes, on n'a pu déceler aucune action de la cote diamétrale sur la précision d'usinage.

Comme les défauts des pièces brutes dépendent de leurs cotes et diminuent régulièrement avec l'exécution de chaque élément de la gamme d'usinage, la relation entre les tolérances de fabrication et les cotes intermédiaires des ébauches est bien définie; il est donc possible de réduire, avec une certaine approximation, les tolérances de fabrication aux tolérances normalisées.

Pour établir la précision éventuelle d'usinage sur des machines-outils, les défauts de départ sont ceux des pièces brutes, qui déterminent la différence de profondeur de coupe; cette différence influe à son tour sur les défauts d'usinage résiduels; il faut donc soumettre à l'étude les défauts des pièces brutes.

Les défauts de fabrication d'un acier laminé à chaud résultent de l'imprécision de fabrication et de l'usure des cannelures des cylindres du laminoir, des défauts de leur réglage, des refoulements élastiques des cylindres pendant le laminage et des variations de température du métal laminé.

En établissant les tolérances des cotes des ébauches matricées à chaud sur des marteaux il faut tenir compte des conditions de réalisation des cotes isolées.

Dans le sens de la frappe (perpendiculaire au plan de joint), la précision de la cote est pour beaucoup influencée par un matriçage insuffisant; c'est pourquoi l'écart supérieur doit être plus grand que l'écart inférieur.

Dans le sens du plan de joint (parallèle à ce plan) un rôle important revient à l'usure de la gravure et aux variations du retrait, car généralement les cotes horizontales sont bien supérieures aux cotes verticales.

Une ébauche matricée reproduit la forme et les dimensions de la dernière gravure; en choisissant les tolérances il faut donc tenir compte de la précision de fabrication des matrices, ainsi que du fait que dans les conditions d'un atelier les ébauches d'un lot ayant la même cote type sont formées non pas sur une mais sur plusieurs matrices.

Toutes ces considérations permettent de déduire qu'il existe une analogie entre les facteurs déterminant la précision en matriçage et en usinage sur des machines-outils; le recul des parties tombantes d'un marteau-pilon, notamment, est identique aux refoulements élastiques d'un système technologique et rend le matriçage insuffisant; l'usure des matrices est identique à l'usure dimensionnelle de l'outil; les défauts de forme résultant des défauts géométriques de la dernière gravure des matrices sont analogues aux défauts de forme qui ont à l'origine les défauts géométriques de la machine; les variations de la valeur du retrait dues aux variations de régime thermique de forgeage correspondent aux écarts des cotes résultant des déformations thermiques des éléments d'un système technologique machine-pièce-outil. De même qu'en usinage simultané des faces opposées, le matriçage s'effectue sans défaut de mise en place, alors que le défaut de réglage du marteau n'agit pas directement sur les cotes à obtenir et sur les contours de l'ébauche formés par la gravure de la matrice; par contre, il produit des défauts de position engendrés par le décalage des matrices.

Il faut noter qu'en travaillant sur des marteaux à bielle et excentrique l'insuffisance éventuelle du matriçage ne peut pas être supérieure à la valeur des déformations élastiques du système presse-matrice par suite de l'absence des coups portés en service et, donc, d'une moindre probabilité de déréglage de la fixation des matrices et du guidage du coulisseau, ainsi que d'un meilleur guidage de la matrice supérieure et de son blocage assuré en position inférieure.

Dans le cas de la coulée dans des moules métalliques, les tolérances des pièces peuvent être calculées d'après les formules suivantes.

Pour les cotes perpendiculaires au plan de joint du moule

$$\delta' = J_j + U'_m + V_r, \tag{77}$$

où δ' est la tolérance de la cote perpendiculaire au plan de joint du moule;
J_j, le jeu (0,03 mm environ) apparu suivant le plan de joint sous l'action de la pression du métal liquide;
U'_m, l'usure admissible du moule, y compris la tolérance de la cote dans le sens de la profondeur des éléments définissant la forme de la pièce;
V_r, les variations de la valeur du retrait de l'alliage de fonderie.

Pour les cotes parallèles au plan de joint:

$$\delta'' = U''_m + V_r, \tag{78}$$

où δ'' est la tolérance de la cote parallèle au plan de joint;
U''_m, l'usure admissible du moule, y compris la tolérance des cotes horizontales des éléments définissant la forme de la pièce;
V_r, les variations de la grandeur du retrait de l'alliage de fonderie.

Lorsque la coulée est effectuée dans des moules en sable, les tolérances imposées pour les cotes des pièces sont fonction de la précision de fabrication des moules et des boîtes à noyaux, de l'élévation du châssis supérieur par la pression hydrostatique du métal liquide, de l'usure des modèles et des boîtes à noyaux, des variations du retrait de l'alliage de fonderie, de la déformation du moule en sable pendant l'extraction du modèle et la coulée du métal.

E. Ecarts de positions relatives des surfaces des éléments associés des ébauches et des pièces mécaniques

Les écarts de positions relatives des ébauches et des pièces mécaniques n'ont aucun rapport avec la tolérance de la cote à respecter; ayant une valeur propre, ils sont spécifiés sur les dessins.

Les causes essentielles qui les produisent sont a) les déformations résiduelles des ébauches et des pièces mécaniques finies; b) les défauts géométriques des machines utilisées pour l'usinage; c) les dépouilles de matriçage et de fonderie; d) les déplacements des matrices et des châssis.

Les déformations permanentes résultent surtout des contraintes internes dues au refroidissement irrégulier des pièces brutes ainsi qu'au traitement thermique; les variations brusques d'échauffement et de refroidissement produits par ce dernier engendrent des contraintes thermiques, alors que les transformations structurelles variables dans le temps et suivant la section de la pièce considérée donnent lieu à des contraintes structurelles. Les déformations permanentes apparaissent également après la redistribution des contraintes internes

provoquée par l'enlèvement du copeau, surtout dans les opérations d'ébauchage. Pour équilibrer les contraintes internes on recourt au vieillissement naturel qui consiste à espacer le dégrossissage et la finition sans toucher aux pièces en travail. Le vieillissement naturel étant très lent, on recourt au vieillissement artificiel qui est un traitement thermique spécial de l'ébauche.

Les déformations dues à la redistribution des contraintes internes lors de la finition des pièces ayant subi le vieillissement sont infimes et on peut les négliger sans porter aucun préjudice à la précision du calcul.

Dans les conditions d'un système élastique machine-pièce-outil les écarts de positions relatives des pièces brutes diminuent régulièrement ; après le dégrossissage ils sont assez grands, mais deviennent infimes après la finition.

Ainsi, les écarts de position résultant des déformations et de la diminution progressive des erreurs après chaque reprise doivent être appréciés :

1) pour les pièces brutes (avant de s'attaquer à la première reprise d'usinage) ;

2) après l'ébauchage et la semi-finition par des outils tranchants (pour préparer la reprise suivante) ;

3) après le traitement thermique.

Il faut tenir compte pourtant que les pièces mécaniques peu rigides se déforment même après la finition.

Les écarts de position résultant des défauts géométriques de la machine peuvent survenir non seulement en ébauchage, mais aussi dans toutes les opérations ultérieures, y compris l'usinage terminal.

Les caractéristiques quantitative et qualitative des écarts de position sont définies essentiellement par la configuration et les relations dimensionnelles des ébauches et des pièces. Si on envisage l'aspect méthodologique du problème, on peut se borner à n'examiner que deux groupes principaux de pièces, communs aux diverses branches de la mécanique.

Le premier groupe comprend les pièces de révolution limitées par des surfaces extérieures, intérieures et en bout.

Le deuxième groupe réunit les pièces planes qui se distinguent par la présence de surfaces de moulage planes et de trous principaux ; ce sont généralement des pièces qui comportent des trous de fixation dont les axes sont perpendiculaires aux plans déterminants de la pièce.

Premier groupe

Les pièces représentatives de ce groupe sont les arbres caractérisés par les écarts de position suivants : pour les surfaces de révolution extérieures ce sont la courbure ρ_c et l'écart de coaxialité ρ_f des fusées

de l'arbre ; pour les bouts comportant des rebords et des flasques, c'est le défaut de perpendicularité ρ_p des bouts par rapport à l'axe de l'arbre ; pour les trous des arbres creux, c'est l'écartement de l'axe du trou ρ_t.

La courbure d'un arbre brut est due surtout à son refroidissement irrégulier.

Malgré la diminution progressive en cours d'usinage des défauts de la pièce brute, une courbure résiduelle demeure ; d'autre part, une

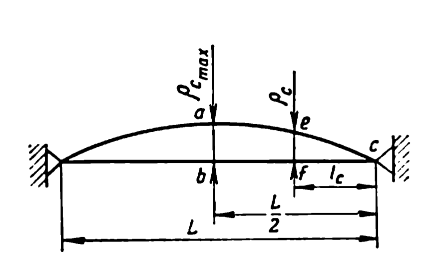


Fig. 59. Illustration du calcul de la courbure d'un arbre monté entre pointes

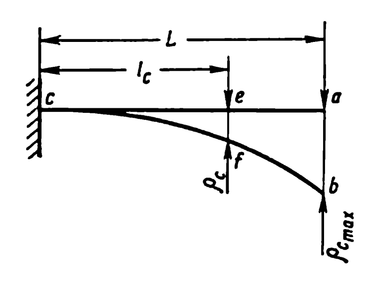


Fig. 60. Illustration du calcul de la courbure d'un arbre monté en l'air

courbure apparaît par suite de la redistribution des contraintes internes résultant de l'enlèvement des couches supérieures chargées.

On peut adopter avec une précision suffisante, pour des buts pratiques, que la courbure maximale $\rho_{c_{max}}$ intéresse la section médiane de l'arbre ; alors

$$\rho_{c_{max}} = \Delta_c L, \qquad (79)$$

où Δ_c est la courbure spécifique en μ/mm ;

L, la longueur totale de l'arbre en mm.

L'examen des figures *abc* et *efc* (fig. 59) permet d'écrire avec approximation pour une ébauche à courbure montée entre pointes

$$ab : ef = \frac{L}{2} : l_c$$

ou

$$\frac{\rho_{c_{max}}}{\rho_c} = \frac{L}{2l_c} .$$

En remplaçant $\rho_{c_{max}}$ par sa valeur on obtient

$$\frac{\Delta_c L}{\rho_c} = \frac{L}{2l_c} ,$$

d'où

$$\Delta_c L \, 2l_c = \rho_c L$$

et

$$\rho_c = \Delta_c \, 2l_c, \tag{80}$$

où l_c est la distance entre la section pour laquelle on établit la courbure et le bout le plus proche ; dans ces conditions $l_c \ll \frac{L}{2}$.

Pour une ébauche montée en l'air (fig. 60) on tire une formule approchée

$$\frac{\rho_{c_{max}}}{\rho_c} = \frac{L}{l_c} ;$$

en remplaçant $\rho_{c_{max}}$ par sa valeur on obtient

$$\frac{\Delta_c L}{\rho_c} = \frac{L}{l_c},$$

d'où

$$\Delta_c L l_c = \rho_c L$$

et

$$\rho_c = \Delta_c l_c, \tag{81}$$

où l_c est la distance entre la section pour laquelle on calcule la courbure et l'appui ; dans ces conditions $l_c \leqslant L$.

Le défaut de coaxialité des fusées d'une pièce brute résultant des défauts de la coulée, du forgeage ou du matriçage diminue nettement après le dégrossissage et disparaît presque après la finition.

Le défaut de perpendicularité des bouts d'une pièce brute par rapport à l'axe de l'arbre est dû aux dépouilles de matriçage (ou à la pente de tronçonnage en forgeage libre). Ce défaut diminue progressivement au cours d'usinage ultérieur. Pourtant dans le cas du tronçonnage des ébauches ou du dressage de leurs bouts sur des machines-outils, ce défaut apparaît lorsque le mouvement d'avance n'est pas perpendiculaire à l'axe de rotation de l'ébauche ; ainsi, les normes de précision des machines sortant des réparations admettent un défaut de perpendicularité des glissières du chariot à l'axe de rotation de la broche ne dépassant pas 0,03 mm sur un rayon de 300 mm (la concavité seule est admissible) ; le défaut de perpendicularité d'un bout dressé ou tourné peut atteindre ainsi 0,1 μ par 1 mm de rayon du bout. Pour ce qui est de l'exécution des épaulements des fusées aux diamètres peu différents, comme nous l'avons déjà dit, le défaut de perpendicularité peut être négligé.

L'écartement de l'axe du trou par rapport à l'axe de l'ébauche résulte du défaut de perpendicularité du mouvement d'avance du foret par rapport à la surface d'entrée (au bout de l'arbre); ce défaut est rendu possible par les écarts de position relative des éléments de la machine ou le défaut de perpendicularité du bout à l'axe de l'arbre; la différence entre les composantes radiales de l'effort de coupe, déterminée à l'attaque par la différence de longueur des arêtes de coupe du foret (affûtage défectueux du foret ou défaut de perpendicularité du mouvement de l'avance à la surface d'entrée); les refoulements élastiques des ensembles de la machine sous l'action des forces de coupe axiales. L'écartement de l'axe diminue avec l'augmentation du diamètre du trou.

Les écarts de positions relatives des surfaces des autres pièces du premier groupe sont:

1. Le défaut de perpendicularité des bouts des pièces brutes par rapport à leur axe résultant des dépouilles de fonderie et de matriçage diminue progressivement avec l'usinage ultérieur. Par contre, ce défaut apparaît en tournage et dressage des bouts, par suite des défauts géométriques de la machine-outil; dans ces conditions, on ne tolère que la concavité. La grandeur du défaut de perpendicularité (ρ_p en μ) est définie dans ce cas suivant la formule

$$\rho_p = \Delta_p (R - r), \tag{82}$$

où Δ_p est le défaut de perpendicularité spécifique en μ/mm (0,1 μ par 1 mm de rayon);

R, le rayon de la surface extérieure de l'ébauche, en mm;

r, le rayon du trou central ou de la surface intérieure, en mm.

2. Le déplacement et l'écartement de l'axe du trou ou de la surface intérieure par rapport à l'axe de la surface extérieure, qui affectent les ébauches et qui diminuent progressivement avec l'usinage ultérieur.

3. Le défaut de coaxialité dans le cas où les ébauches comportent des fusées.

Dans certains cas on peut négliger le défaut de perpendicularité des bouts des bagues et des douilles (surtout lorsque l'épaisseur de leurs parois est faible). L'écart de positions relatives le plus courant des surfaces de ces pièces est l'excentricité du trou par rapport à la surface extérieure.

Pour les disques le défaut de perpendicularité des surfaces latérales est l'écart de position le plus important par suite de l'étendue de ces surfaces. D'autre part, le déplacement et l'écartement de l'axe du trou jouent un rôle décisif entraînant l'excentricité du trou par rapport à la surface extérieure et produisant un faux-rond de rotation et un battement axial. Pour les pièces à fusées, le défaut ayant une importance notable est celui de coaxialité des fusées.

Deuxième groupe

Les écarts de positions relatives des surfaces des planchettes, des crémaillères et d'autres pièces de ce genre sont : la courbure qui intéresse les pièces brutes mais qui peut également apparaître en usinage (surtout si les pièces sont longues) et résultant du défaut de rectitude des glissières sur lesquelles se déplace la table d'une fraiseuse ou d'une raboteuse ; le défaut de perpendicularité et, en général, l'écart de position angulaire imposée aux surfaces planes de la pièce, qui apparaissent pendant l'exécution de l'ébauche ou pendant l'usinage par suite des défauts géométriques de la machine.

Les barres peuvent également donner lieu à une courbure, mais son influence sur l'usinage ultérieur diminue par suite d'une faible longueur relative de la pièce. L'écart de position angulaire imposée aux surfaces planes garde toute sa valeur pour les barres comme pour les planchettes.

Pour calculer la courbure des planchettes on utilise la formule (79):

$$\rho_c = \Delta_c L.$$

Les plaques sont susceptibles de gauchissement traduit par la courbure de la pièce enregistrée dans le sens de la largeur et de la longueur ; la valeur du gauchissement ρ_g peut être calculée avec une précision suffisante pour des buts pratiques suivant la formule

$$\rho_g = \Delta_g L, \tag{83}$$

où Δ_g est le gauchissement spécifique, en μ/mm ;
L, la longueur de l'ébauche, en mm.

Le gauchissement diminue progressivement avec l'usinage ultérieur. Dans certains cas, en plus du gauchissement, l'écart de position angulaire imposée aux principaux plans des plaques joue également un certain rôle.

Les écarts de positions relatives des surfaces planes des pièces de support, des équerres, des poutres sont produits par les défauts de parallélisme ou de perpendicularité résultant des écarts de position relative des éléments d'exécution de la machine en service. Pour les trous principaux et de fixation les défauts caractéristiques sont le déplacement et l'écartement de leurs axes. Les pièces de ce groupe se déforment sous l'action de la redistribution des contraintes internes (surtout après ébauchage) qui engendre des écarts de positions des surfaces résiduels.

§ 4. Calcul des défauts d'usinage pour le cas du procédé d'obtention unitaire des cotes

Causes des défauts d'usinage dans l'obtention unitaire des cotes. Calcul de l'erreur totale (cumulée). Définition des grandeurs qui constituent l'erreur totale. Causes des défauts de fabrication des pièces brutes obtenues par forgeage libre et par moulage à la main dans des moules en sable. Ecarts de position relative des surfaces en usinage des ébauches unitaires.

L'étude des facteurs qui déterminent l'apparition des défauts d'usinage dans le procédé d'obtention automatique des cotes peut être mise à profit pour assurer la précision nécessaire pour l'obtention unitaire des cotes, compte tenu pourtant de certaines particularités de ce procédé.

L'exécution des ébauches unitaires par le procédé d'obtention unitaire des cotes diminue également d'une façon progressive après chaque reprise les défauts d'une pièce brute; cette diminution est définie par les conditions de coupe et la flexibilité du système machine-pièce-outil. Un dégrossissage préalable, très fréquent dans le procédé d'obtention unitaire des cotes, diminue nettement l'influence exercée par les défauts de forme et les écarts de position relative des surfaces d'une pièce brute sur la précision ; mais en dégrossissage et en semi-finition ces défauts restent encore assez importants et on doit en tenir compte en recherchant l'erreur totale.

L'erreur ΔY due aux variations des refoulements dans le système élastique machine-pièce-outil, qui se manifeste pendant les passes d'essai, peut être éliminée par des mesures d'essai de la remise à la cote de l'outil. Mais une fois l'outil mis à la cote, les refoulements réels qui interviennent dans les sections suivant la longueur de l'ébauche influent dans ces sections sur la cote à respecter.

Le défaut de la mise en place d'une ébauche obtenue par le procédé unitaire est défini, comme on sait, par le défaut de son dégauchissage, dont on tient justement compte en calculant l'erreur totale (cumulée).

Lors des passes d'essai, les mesures s'effectuent à partir d'une surface de référence ; c'est pourquoi la valeur du défaut de dégauchissage est définie par la différence entre les distances de la surface de référence à l'outil mis à l'épaisseur du copeau ; cette différence peut résulter de l'imprécision du dégauchissage ou de l'affaissement inégal par suite d'un serrage inégal d'un point isolé à l'autre.

Le défaut de la mise en place d'une ébauche avec dégauchissage ε_B dépend dans une grande mesure des aptitudes professionnelles de l'opérateur qui effectue le réglage ; il est choisi en fonction des données expérimentales.

En construction mécanique lourde on prend : a) le défaut de la mise en place de l'ébauche avec dégauchissage d'après le traçage, de $\pm 0,5$ à $\pm 1,5$ mm ; b) le défaut de la mise en place avec dégauchis-

sage d'après la surface usinée, de ±0,1 à ±0,3 mm ; c) le défaut de la mise en place avec dégauchissage d'après une surface brute, de ±1,5 à ±3,0 mm, en fonction des cotes de l'ébauche [1].

La mise à profondeur d'un outil à l'aide de passes d'essai et de mesures est susceptible d'une erreur liée à l'imprécision des mesures, dite *erreur de mesure*, analogue à l'erreur de réglage de la machine appliquée dans l'obtention automatique d'une cote.

La valeur de l'erreur de mesure Δ_{mes} est fonction du procédé de mesure et des instruments utilisés. Pour les cotes allant de 50 à 500 mm notamment, les erreurs de mesure varient de 6 à 300 μ suivant le genre de la surface mesurée et des instruments employés. La cote à respecter n'est influencée que par la mesure effectuée lors de la dernière passe d'essai.

Lors du façonnage des ébauches à encombrement important, l'accroissement Δ_u de la cote à obtenir produit par l'usure dimensionnelle de l'outil n'est perceptible que pendant une seule passe, car la passe suivante se fait avec une nouvelle mise à la cote de l'outil. Les petites surfaces sont usinées en négligeant l'usure dimensionnelle.

Les défauts de forme d'une ébauche produits par les défauts géométriques de la machine $\Sigma\Delta_m$ sont définis et appréciés par le calcul de l'erreur totale ainsi qu'il en a été pour l'obtention des cotes par le procédé automatique.

Pendant les passes d'ébauche et les mesurs d'essai, les déformations thermiques des éléments du système machine-pièce-outil ne peuvent influencer la précision que dans les limites de chaque passe donnée. Dans ces conditions, lorsque les déformations thermiques deviennent importantes, leur action peut être nettement affaiblie par la correction de la position de l'outil. On peut donc ne pas en tenir compte dans plusieurs cas d'usinage par le procédé d'obtention unitaire des cotes.

La formule générale du calcul de l'erreur de la cote à respecter, obtenue par le procédé d'obtention unitaire des cotes, peut être déduite d'une manière analogue à la formule (71):

$$\Delta\delta \approx \Delta Y + \sum \Delta_m + \Delta_{mes} + \Delta_u + \varepsilon_d + \sum \Delta T , \qquad (84)$$

où $\Delta\delta$ est l'erreur totale de la cote à respecter lors de la passe considérée de l'outil;

ΔY, la différence des refoulements limites du système élastique machine-pièce-outil résultant des variations de l'effort de coupe et de la flexibilité du système lors de la passe considérée de l'outil;

[1] Voir Annexe 2.

$\Sigma\Delta_m$, la somme arithmétique des écarts dimensionnels engendrés par les défauts de forme de la surface usinée produits par les défauts géométriques de la machine;
Δ_{mes}, l'écart de la cote produit par l'erreur de mesure lors de la dernière passe d'essai;
Δ_u, l'accroissement de la cote à respecter dû à l'usure dimensionnelle de l'outil au cours de chaque passe;
ε_d, le défaut de dégauchissage lors de la mise en place de l'ébauche;
$\Sigma\Delta T$, la somme algébrique (compte tenu du signe) des écarts dimensionnels dus aux déformations thermiques des éléments du système technologique, perpendiculaires à la surface usinée.

On sait que lors de l'exécution des surfaces de révolution, le défaut de dégauchissage ε_d n'influe pas sur la cote à respecter; dans ce cas la formule (84) s'écrit

$$\Delta\delta \approx 2\,(\Delta Y + \sum \Delta_m + \Delta_{mes} + \Delta_u + \sum \Delta T). \qquad (85)$$

Pour l'exécution par passes d'essai des surfaces relativement petites d'une pièce unitaire, on peut négliger l'usure dimensionnelle de l'outil et les déformations thermiques; la formule (85) s'écrit alors

$$\Delta\delta \approx 2\,(\Delta Y + \sum \Delta_m + \Delta_{mes}).$$

Les défauts de forme produits par les défauts géométriques de la machine sont renforcés par les défauts de forme résultant des refoulements élastiques des éléments du système technologique; ainsi, le défaut de parallélisme des glissières du banc et de l'axe de la broche dans le plan horizontal engendre une conicité dans la direction de la poupée et, lorsque $W_p < W_c$, diminue d'une manière définie le défaut de forme produit par les refoulements élastiques; dans ces conditions, le défaut de parallélisme des glissières du banc et de l'axe de la broche dans le plan vertical compromet à sa manière la forme, alors que la forme elliptique des portées de la broche de la poupée ajoute à ce défaut une ovalisation. Il faut tenir compte du fait que lors du réglage de la machine pour l'usinage entre pointes, le déplacement judicieux de la contre-poupée permet d'éliminer une conicité éventuelle.

La précision élevée assurée par le mode d'obtention unitaire des cotes est à noter. Ainsi, pour le tournage des arbres lourds de 800 à 1 000 mm de diamètre les écarts des cotes diamétrales varient de 0,02 à 0,04 mm, alors que ceux des longueurs des fusées, de 0,05 à 0,2 mm.

Les écarts de positions relatives des surfaces de tels arbres sont compris entre les limites suivantes: pour la courbure de l'axe par 1 m de longueur les écarts varient de 0,005 à 0,01 mm; pour la coaxialité des portées, de 0,01 à 0,02 mm; pour l'excentricité des rebords de

centrage par rapport aux portées, pas plus de 0,03 mm ; le battement radial d'un flasque le long d'un bras de 1 000 mm, de 0,025 à 0,050 mm.

Lorsque le travail s'effectue par le procédé d'obtention unitaire des cotes, on recourt largement à la mise à la cote de l'outil à l'aide d'un vernier susceptible d'assurer une précision très poussée de la passe.

Les pièces brutes devant être usinées par le procédé d'obtention unitaire des cotes sont confectionnées généralement par forgeage libre ou par moulage à la main dans des moules en sable.

Les erreurs des cotes et les défauts de forme des pièces brutes venues de forgeage libre sont déterminés par la configuration, les dimensions et le poids des ébauches, ainsi que les aptitudes professionnelles de l'opérateur.

La précision des ébauches coulées à la main dans des moules en sable est définie par celle de la fabrication des modèles et des boîtes à noyaux, par le degré d'ébranlage du modèle lors de son dégagement du moule, le soulèvement du châssis supérieur par la pression hydrostatique du métal liquide, le gonflement du moule, le refroidissement irrégulier des éléments de la pièce coulée, les variations du retrait de l'alliage de fonderie.

Dans le moulage à la main la valeur de l'ébranlage du modèle est déterminée par les dimensions du modèle et varie de 0,5 à 5 mm, et même plus dans des cas particuliers. On en tient compte lors de l'exécution du modèle en diminuant de façon respective ses cotes ; pourtant la valeur de l'ébranlage prévue par la fabrication du modèle ne correspond pas avec précision à sa valeur réelle, ce qui détermine les écarts de la cote après le moulage.

La valeur du soulèvement du châssis supérieur par la pression hydrostatique du métal liquide dépend du procédé de fixation des châssis ou du poids de la charge que porte le châssis supérieur ; c'est pourquoi les écarts des cotes d'une pièce coulée dans le sens perpendiculaire au plan de joint du moule sont généralement supérieurs aux écarts dans le sens parallèle à ce plan. Lors de la coulée dans un moule des pièces à parois verticales épaisses, leurs parois sont susceptibles d'un gonflement provoquant un écart par rapport aux dimensions imposées.

Un refroidissement inégal des parties isolées d'une pièce coulée mal conçue peut modifier les dimensions et la configuration sous l'effet des contraintes de retrait.

Lors de la fabrication des modèles leurs dimensions sont établies compte tenu du retrait de l'alliage de fonderie. Pourtant les écarts admissibles de la composition chimique de l'alliage et les variations de température du métal liquide, qui ont lieu pendant la coulée, produisent des variations de retrait et donc des écarts par rapport aux cotes des pièces venues de fonderie. Les dépouilles de fonderie

présentent des défauts de forme dans le sens des parois verticales de la pièce.

Le déplacement des châssis résultant de l'usure des chevilles et des bagues perturbe également quelque peu la forme des pièces de fonderie.

Les écarts de positions relatives des surfaces des pièces unitaires sont définis par les mêmes facteurs et les mêmes causes que ceux qui ont été examinés lors de l'exposé du procédé d'obtention automatique des cotes.

§ 5. Procédés statistiques d'étude de la précision d'usinage

Courbes de distribution et domaine de leur application. Courbes de distribution des cotes. Influence des erreurs systématiques sur la forme de la courbe de distribution et sa position en abscisse. Caractéristique de la courbe de Gauss. Valeur arithmétique moyenne. Ecart type et amplitude de la distribution des cotes. Probabilité d'obtention des valeurs réelles de la cote à respecter dans l'intervalle des écarts imposés au lot d'ébauches. Graphiques des points critiques et domaines de leur application.

L'analyse statistique des courbes de distribution appliquée à l'étude de la précision d'usinage est fondée sur les principes établis par la théorie des probabilités et la statistique mathématique. Cette méthode est applicable dans les conditions de la fabrication d'un grand nombre de pièces analogues par le procédé automatique d'obtention des cotes sur des machines réglées à l'avance.

Les méthodes statistiques font état des erreurs accidentelles et des erreurs systématiques.

Les erreurs accidentelles sont dues à de nombreuses causes incontrôlables n'ayant aucun rapport entre elles, mais pouvant provoquer telle ou telle erreur d'usinage.

Les causes des erreurs systématiques sont en principe connues; ces erreurs restent constantes ou changent régulièrement leur valeur au sein d'un lot usiné.

Les erreurs accidentelles donnent lieu à une dispersion des cotes d'un lot d'ébauches ou de pièces façonnées dans les mêmes conditions. L'intervention simultanée des erreurs systématiques rend difficile l'appréciation des résultats de l'analyse. Pour rendre plus directe l'intelligence des observations on construit les courbes de distribution des cotes réelles.

Dans ce but on prend sur toutes les pièces du lot la mesure de la cote envisagée. Pour éliminer l'action des erreurs systématiques, la section où la mesure est prise ainsi que les conditions de cette opération doivent être les mêmes pour toutes les pièces.

Les résultats obtenus sont classés en une suite de termes convergente (*tableau 1*) et groupés suivant l'intervalle des cotes établi. Ensui-

Tableau 1

Résultats de la mesure d'une cote des pièces d'un lot, en mm

7,920	7,935	7,940	7,957	7,960	7,965
7,970	7,970	7,972	7,975	7,975	7,980
7,980	7,982	7,985	7,985	7,988	7,988
7,990	7,991	7,992	7,992	7,994	7,995
7,995	7,998	8,000	8,000	8,002	8,004
8,005	8,007	8,010	8,012	8,015	8,017
8,018	8,022	8,022	8,024	8,024	8,027
8,030	8,040	8,040	8,045	8,048	8,065
8,068	8,080				

Tableau 2

Fréquences absolue et relative d'une cote dans un lot de pièces

Intervalles	Fréquence absolue m	Fréquence relative $m:n$
Plus de 7,910 à 7,930	1	0,02
» » 7,930 à 7,950	2	0,04
» » 7,950 à 7,970	5	0,10
» » 7,970 à 7,990	11	0,22
» » 7,990 à 8,010	14	0,28
» » 8,010 à 8,030	10	0,20
» » 8,030 à 8,050	4	0,08
» » 8,050 à 8,070	2	0,04
» » 8,070 à 8,090	1	0,02
	$\sum m = n = 50$	$\sum m:n = 1,00$

te on définit la fréquence absolue et relative des cotes au sein de l'intervalle considéré. La fréquence absolue est définie par le nombre m de pièces ou d'ébauches qui ne dépassent pas l'intervalle considéré des cotes. La fréquence relative est le quotient du nombre m par le nombre total de pièces n. Les résultats de cette division sont consignés sur le *tableau 2*. En portant en abscisse les cotes et en ordonnée la fréquence relative propre à chaque intervalle de cotes, on obtient une ligne brisée qui se confond d'autant mieux avec une courbe régulière (fig. 61) que le nombre des pièces d'un lot et le nombre d'intervalles (c'est-à-dire l'espacement au sein de l'intervalle) seront grands.

Une erreur systématique constante au sein d'un lot (le défaut de réglage de la machine, par exemple) n'influe pas sur la forme de la courbe, mais la déplace en abscisse. Une erreur systématique variable qui change progressivement au cours de l'usinage d'un lot de pièces (définie par l'usure de l'outil, par exemple) intervient en modifiant la courbe du fait de l'augmentation de l'amplitude accrue de la distribution des cotes (différence entre le maximum et le minimum des cotes observées) qui détermine la distance entre les abscisses des valeurs limites. Voici à titre d'illustration quelques exemples.

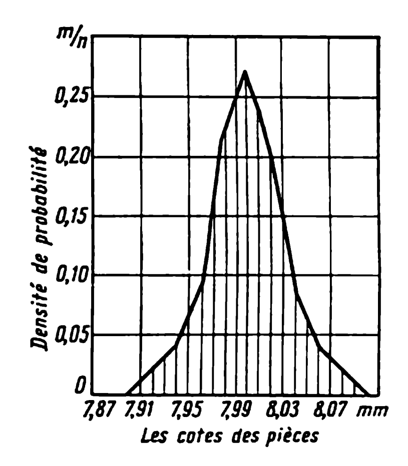


Fig. 61. Etablissement de la courbe de distribution des cotes

Si les courbes de distribution sont dressées pour deux lots d'ébauches usinées, l'un avec un réglage de la machine et l'autre, dans les mêmes conditions mais avec un autre réglage, il est évident qu'on obtient des courbes identiques mais déplacées en abscisse l'une par rapport à l'autre à la distance ΔR qui traduit la différence entre la mise à la cote de l'outil (fig. 62). L'écart de position de l'outil mis à la cote ainsi que les tolérances imposées aux outils de précision (forets,

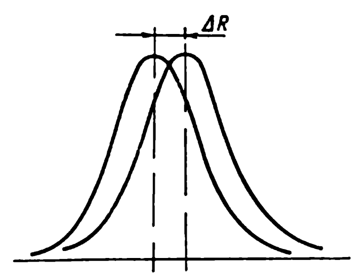
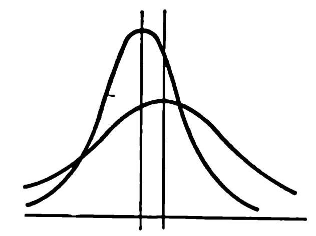


Fig. 62. Ecart enregistré par la courbe de distribution par suite du défaut de réglage de la machine


Fig. 63. Modification de la courbe de distribution sous l'effet de l'usure dimensionnelle de l'outil

forets aléseurs, alésoirs, broches, fraises à rainurer, etc.) constituent des défauts de réglage de la machine et font partie des erreurs systématiques.

Dans le cas de l'usinage d'un lot important, la confrontation de deux courbes construites pour le même réglage de la machine, mais

l'une pour la partie du lot constituée d'ébauches façonnées au début de l'expérience, lorsque l'usure de l'outil est encore négligeable, et l'autre, pour l'ensemble du lot, y compris sa première partie, rend évidente la différence de forme définie par la modification de l'amplitude des variations de la cote ; cette modification est due à la progression de l'usure dimensionnelle de l'outil (fig. 63).

Les courbes de distribution des cotes des ébauches exécutées avec plusieurs réglages de la machine ou mesurées dans des sections diverses (surtout dans le cas de pièces non rigides) forment de nombreuses bosses.

Les bosses nombreuses rendent difficile l'étude de la précision d'usinage ; c'est pourquoi il faut examiner à part la dispersion des cotes exécutées pendant le même réglage et mesurées au droit d'une section définie, et les erreurs systématiques caractérisées par le décalage des courbes en abscisse.

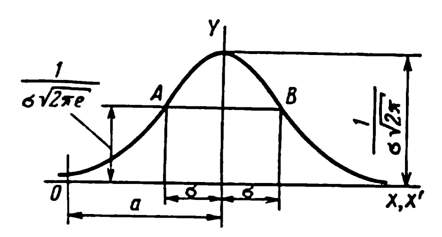


Fig. 64. Courbe de la distribution normale

La statistique mathématique fait appel aux diverses lois de distribution des valeurs aléatoires matérialisées par de différentes courbes de distribution. Les courbes obtenues par l'étude de la précision diffèrent elles aussi. Par contre, la majorité des courbes qui définissent les pièces mécaniques façonnées sur des machines réglées à l'avance par le procédé d'obtention automatique des cotes s'approchent des courbes de distribution normale (courbe de Gauss).

Suivant des travaux de recherche, la précision de l'exécution des ébauches lors de l'obtention automatique des cotes est également régie plus ou moins par la *loi normale*.

La courbe normale qui définit la loi de Gauss est représentée sur la figure 64. D'une forme convexe arrondie au sommet elle comporte de chaque côté les points d'inflexion A et B (fig. 64) au-delà desquels la courbe s'approche asymptotiquement de l'axe des abscisses (lorsque x tend vers $\pm\infty$, y tend vers 0). La courbe normale (courbe de Gauss) est définie par la fonction

$$y = \varphi(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}, \tag{86}$$

où σ est l'écart-type ou l'écart quadratique moyen, c'est-à-dire la racine carrée de la variance (moyenne arithmétique des carrés de tous les écarts) ;

e, la base des logarithmes népériens ;

a, le mode de la courbe, c'est-à-dire la valeur de l'abscisse x qui correspond au sommet de la courbe y_{max}; le paramètre a est le centre de distribution ou de groupement des valeurs de l'argument; c'est en même temps la moyenne arithmétique de la distribution (moyenne de la distribution).

Notons certaines autres propriétés de la courbe de Gauss; elle est symétrique par rapport à la droite perpendiculaire à l'axe des abscisses en $x = a$; l'ordonnée y_{max} du sommet de la courbe est définie par l'expression

$$y_{max} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \approx 0{,}4\,\frac{1}{\sigma};$$

les abscisses des points d'inflexion :

$$x_A = a - \sigma \quad \text{et} \quad x_B = a + \sigma;$$

les ordonnées des points d'inflexion :

$$y_A = y_B = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi e}} = \frac{y_{max}}{\sqrt{e}} \approx 0{,}6 y_{max}.$$

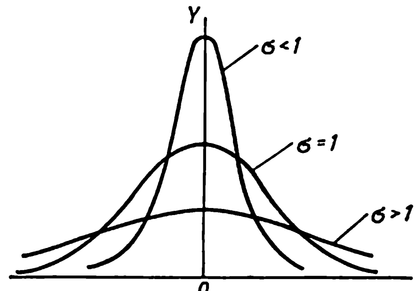


Fig. 65. Influence de la valeur σ sur la forme de la courbe de distribution normale

Après le changement de variable $x = x' + a$ l'équation de la courbe s'écrit

$$y = \varphi(x') = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x'^2}{2\sigma^2}}; \tag{87}$$

lorsque $\sigma = 1$,

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x'^2}{2}}; \tag{88}$$

lorsque σ croît ($\sigma > 1$), la courbe s'aplatit tout en s'allongeant dans le sens de l'axe des abscisses, la distribution devenant ainsi plus régulière, car pour des valeurs de $|x|$ importantes, l'ordonnée y est d'autant plus grande que la valeur de σ est plus grande elle aussi. La diminution de σ ($\sigma < 1$) entraîne la poussée de la courbe en hauteur, la courbe s'étale dans le sens de l'axe des abscisses; c'est le cas où même pour de faibles valeurs de $|x|$ la courbe s'approche de près de l'axe des abscisses. La figure 65 montre la façon dont la courbe normale se modifie en fonction de σ.

L'aire située sous la courbe normale est

$$\int_{-\infty}^{+\infty} y\,dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}\,dx = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{0}^{\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}\,dx. \tag{89}$$

Lorsque x prend successivement les valeurs de $x_i = x_1, x_2, \ldots, x_n$ c'est-à-dire lorsque sa variation est discontinue, la moyenne arithmétique notée généralement par $\bar{x}$ est définie par l'équation

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \ldots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i. \tag{90}$$

L'écart-type s'écrit

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}. \tag{91}$$

Pour un grand nombre d'observations, σ définit avec une précision suffisante la distribution des valeurs de l'argument, même lorsque la courbe de distribution se distingue quelque peu de la courbe de Gauss. Si le nombre d'observations est d'un ordre inférieur ou égal à 10, le paramètre σ ne définit pas la distribution ; dans ces conditions il est plus rationnel d'utiliser l'amplitude de la distribution R qui est la différence entre la plus grande et la plus petite valeur de l'argument x:

$$R = x_{max} - x_{min}. \tag{92}$$

Il faut noter que ce paramètre statistique ne donne qu'une idée générale de la distribution des x, d'autant moins précise que le nombre d'observations est plus grand, et inversement.

La composition d'un tableau rend beaucoup plus facile le calcul de $\bar{x}$ et de σ (*tableau 3*).

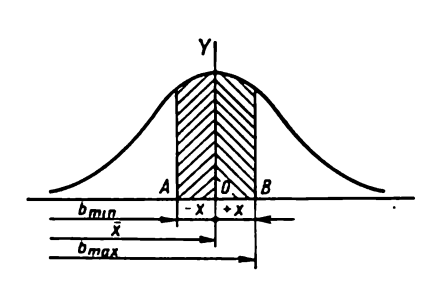


Fig. 66. Illustration de la probabilité d'obtention des cotes comprises dans l'intervalle des tolérances $\pm x$

Tableau 3

x_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
7,920	0,080	0,0064
7,935	0,065	0,0042
7,940	0,060	0,0036
. . .	. . .	. . .
. . .	. . .	. . .
8,048	0,048	0,0023
8,065	0,065	0,0042
8,080	0,080	0,0064

$$\sum_{i=1}^{50} x_i \approx 400 \text{ mm} ; \sum_{i=1}^{50} (x_i - \bar{x})^2 \approx 0{,}053; \ \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i = \frac{1}{50} \cdot 400 = 8 \text{ mm} ;$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{50} \cdot 0{,}053} \approx 0{,}0326.$$

En posant que la distribution des cotes lors de l'exécution de la reprise est régie par la loi normale, on peut prévoir les résultats d'un travail réalisé dans des conditions définies.

Soit une reprise dont l' observation donne la courbe de distribution représentée sur la figure 66. La surface limitée par la courbe définit à une certaine échelle le nombre total d'ébauches usinées pendant le même réglage de la machine. L'aire comprise entre les points A et B définit à la même échelle le nombre d'ébauches dont les cotes ne dépassent pas ces points.

Si on impose aux pièces un intervalle de variation entre les limites supérieure b_{max} et inférieure b_{min}, les ébauches acceptables sont celles dont les cotes ne le dépassent pas, c'est-à-dire celles qui se trouvent entre les points A et B. Ainsi, l'aire hachurée de la figure 66 définit le nombre d'ébauches acceptables, alors que les parties non hachurées correspondent au nombre de pièces dont les cotes dépassent les limites imposées.

La probabilité d'obtenir de bonnes ébauches est déterminée par le rapport de l'aire hachurée à l'aire totale délimitée par la courbe de distribution et l'axe des abscisses.

L'aire qui correspond à l'intervalle de tolérances imposé $x = x_i - \bar{x}$ est définie par l'intégrale

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx,$$

qu'il est commode d'écrire sous forme de la fonction de

$$z = \frac{x}{\sigma} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma}$$

notée généralement $\Phi(z)$; dans ces conditions

$$\Phi(z) = 2F(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \tag{93}$$

Toute l'aire de la courbe normale étant égale à 1, on tire

$$\Phi(\infty) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz = 1 ; \tag{94}$$

aussi $\Phi(z)$ exprime le quotient de l'aire limitée par la courbe de Gauss relative à l'intervalle imposé $\pm x$ (fig. 66) par toute l'aire comprise entre la courbe de distribution et l'axe des abscisses.

Donc, la valeur de $\Phi(z)$ définit la probabilité de réalisation de la cote dans les limites de l'intervalle $\pm x$.

Les calculs étant très complexes, les ouvrages consacrés à la théorie des probabilités et à la statistique mathématique donnent généralement des tableaux des valeurs de Φ (z) pour chaque centième de la variable.

Le tableau 4 indique ces valeurs pour chaque dizième.

Tableau 4

z	$\Phi(z)$	$F(z)$	z	$\Phi(z)$	$F(z)$
0,0	0,0000	0,0000	1,0	0,6827	0,3413
0,1	0,0797	0,0398	1,1	0,7287	0,3643
0,2	0,1585	0,0793	1,2	0,7699	0,3849
0,3	0,2358	0,1179	1,3	0,8064	0,4032
0,4	0,3108	0,1554	1,4	0,8385	0,4192
0,5	0,3829	0,1915	1,5	0,8664	0,4332
0,6	0,4515	0,2257	1,6	0,8904	0,4452
0,7	0,5161	0,2580	1,7	0,9109	0,4554
0,8	0,5763	0,2881	1,8	0,9281	0,4641
0,9	0,6319	0,3159	1,9	0,9426	0,4713
2,0	0,9545	0,4772	2,8	0,9949	0,4974
2,1	0,9643	0,4821	2,9	0,9963	0,4981
2,2	0,9722	0,4861	3,0	0,9973	0,49865
2,3	0,9786	0,4893	3,1	0,99806	0,49903
2,4	0,9836	0,4918	3,2	0,99862	0,49931
2,5	0,9876	0,4938	3,3	0,99903	0,49952
2,6	0,9907	0,4953	3,4	0,99933	0,49966
2,7	0,9931	0,4965	3,5	0,99953	0,49977

Ayant

$$z = \frac{x}{\sigma},$$

on obtient

$$x = z\sigma.$$

Posons $z = 3$; il vient

$$x = 3\sigma; \quad \pm x = \pm 3\sigma = 6\sigma. \tag{95}$$

D'après le tableau 4, pour $z = 3$, $\Phi(z) = 0{,}9973$; ainsi, la probabilité (fréquence) de réaliser la cote b sans qu'elle dépasse l'intervalle de tolérances $\pm x = 6\sigma$ constitue 99,73 %; donc le risque d'obtenir des cotes qui sortent de l'intervalle imposé est inférieur à 0,3 %.

Ainsi, 6σ ou $\pm 3\sigma$ définissent la dispersion maximale des cotes dont il faut pratiquement tenir compte. En d'autres termes, en calculant $\bar{x}$ et σ sur la base de plusieurs observations et en adoptant 6σ nous pouvons définir, sans construire le graphique, le champ de dispersion des cotes dont la probabilité d'obtention est voisine de 1, c'est-à-dire de la vraisemblance.

La grandeur 6σ est la valeur totale de toutes les erreurs accidentelles, ainsi que des erreurs systématiques qui changent progressivement en cours d'usinage d'un lot d'ébauches; il s'agit notamment des erreurs dues à l'usure dimensionnelle de l'outil et aux déformations thermiques des éléments du système machine-pièce-outil (tant que ces déformations ne se sont pas stabilisées). Ces erreurs interviennent naturellement sur les variations des cotes réelles établies par la mesure des ébauches. La valeur de σ ne tient pas compte des défauts de réglage de la mise à la cote de la machine, ainsi que de ceux de la forme de la surface usinée résultant des défauts géométriques de la machine.

Le calcul de σ ne traduit pas non plus le défaut de mise en place d'une ébauche pour l'usinage sur une machine-outil, défaut susceptible de compromettre la cote à respecter, de même que d'autres erreurs systématiques qui gardent leur valeur au cours de l'usinage du lot considéré sans changer le réglage.

Ainsi, la tolérance technologique imposée par les formules (71) à (74) ne peut être confrontée avec la valeur de 6σ. Mais on peut comparer

$$\Delta Y + \Delta U + \sum \Delta T \approx 6\sigma$$

pour l'enlèvement unilatéral du copeau, et

$$2(\Delta Y + \Delta U + \sum \Delta T) \approx 6\sigma$$

pour l'exécution des surfaces de révolution et le façonnage simultané des plans opposés; dans ces conditions pour une section définie de l'ébauche, c'est-à-dire pour une flexibilité constante du système, la valeur de ΔY doit être calculée suivant la formule

$$\Delta Y = W_{syst} (F_{y_{max}} - F_{y_{min}}).$$

Pour définir la valeur de 6σ, les mesurages des ébauches s'effectuent suivant la même section.

En les confrontant il faut tenir compte du fait que l'erreur moyenne est de $\pm 0{,}1\sigma$ pour 50 mesurages.

La méthode statistique des courbes de distribution a l'inconvénient de ne pas prendre en considération l'ordre d'usinage. Il s'ensuit que les erreurs systématiques ne sont pas examinées séparément des erreurs accidentelles et que la distribution observée ne définit que l'effet commun de ces erreurs.

La méthode statistique des graphiques des points critiques consiste à figurer les résultats d'usinage d'un lot dans l'ordre d'arrivée des pièces.

Les diagrammes des points critiques peuvent être également construits pour plusieurs lots usinés successivement. Les réglages successifs de la machine ou les retouches de réglage se traduisent par la modification générale des cotes.

Pour dresser les graphiques des points critiques on porte en abscisse les numéros d'ordre des ébauches usinées successivement, et en ordonnée, les cotes obtenues. Le diagramme est rendu plus court lorsqu'on classe les ébauches du lot par groupes de quelques unités usinées successivement. On porte alors en abscisse non pas les numéros d'ordre des ébauches, mais ceux des groupes dans leur ordre d'arrivée. Dans ces conditions les points représentant les cotes des pièces d'un groupe se situent sur la même verticale, alors que leur dispersion caractérise la distribution des cotes du groupe (voir fig. 53 et 54).

Un tel graphique rend difficile l'établissement du sens dans lequel la cote se modifie au sein du lot. Si au lieu des cotes des ébauches isolées on porte sur le diagramme les valeurs moyennes des cotes obtenues pour le groupe, au lieu de plusieurs points on obtient un seul point critique, celui de la moyenne arithmétique des cotes du groupe ; dans ces conditions le principe de la modification des moyennes du groupe, dont la dispersion est inférieure à celle des cotes des ébauches isolées, est mis en évidence avec plus de relief.

Si la distribution des cotes d'un lot d'ébauches usinées est régie par la loi normale, il en est de même pour les moyennes des groupes mais compte tenu de l'écart-type $\sigma_{ég}$; ainsi,

$$\sigma_{ég} = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}, \tag{96}$$

où σ est l'écart-type pour l'ensemble du lot ;

m, le nombre d'ébauches dans le groupe.

La fig. 67 représente le graphique établi pour des ébauches obtenues par l'usinage successif des groupes de cinq pièces.

Les graphiques de ce genre peuvent être construits également suivant l'amplitude de la distribution (ou la longueur de phase) pour chaque groupe. La figure 68 représente un tel diagramme, construit pour le même lot d'ébauches.

Si la dispersion est régie par la loi normale, la longueur de phase L de chaque groupe permet de calculer la valeur σ pour l'ensemble du lot suivant la formule

$$\sigma = \frac{L_{moy}}{dm}, \tag{97}$$

où L_{moy} est la valeur moyenne de la longueur de phase pour tous les groupes ;

dm, le coefficient qui associe les valeurs de L_{moy} et de σ.

La valeur moyenne de la longueur de phase s'écrit

$$L_{moy} = \frac{L_1 + L_2 + \ldots + L_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} L_i,$$

où n est le nombre de groupes prélevés;

$L_1, L_2, \ldots, L_n$, la longueur de phase pour les groupes 1, 2, ..., n.

Le coefficient dm est choisi suivant le nombre d'ébauches dans le groupe:

Nombre d'ébauches dans le groupe	3	5	7	9	11	13	15
Valeur du coefficient dm	1,693	2,326	2,704	2,970	3,172	3,336	3,472

La méthode des graphiques des points critiques est appliquée dans de nombreuses études statistiques, surtout lorsqu'il s'agit

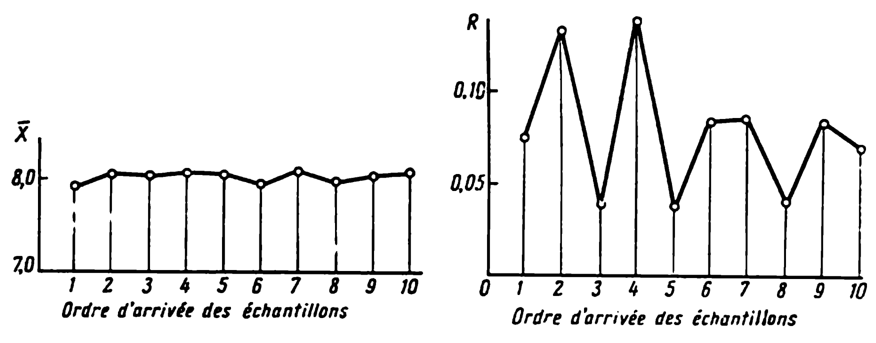


Fig. 67. Graphique des points critiques des moyennes de groupe

Fig. 68. Graphique des points critiques de l'amplitude de la distribution des cotes

d'assurer le contrôle statistique des cotes obtenues par usinage sur des machines-outils, et en général le contrôle statistique de la qualité de production.

Les méthodes statistiques peuvent être utilisées pour résoudre plusieurs problèmes relatifs aux conditions de fabrication définies et invariables. D'autre part, on fait appel à des méthodes statistiques lorsque la mécanique des phénomènes est encore peu étudiée ou lorsque les valeurs recherchées ne peuvent pas être définies par le calcul. Un autre procédé qui permet d'établir la précision éventuelle est celui du calcul analytique qui met en évidence le mécanisme des phénomènes se déroulant en usinage et suggère des moyens autorisant une modification rationnelle et réfléchie de la gamme de fabrication dans le but d'accroître la précision d'usinage.

§ 6. Qualité de la surface des ébauches et des pièces mécaniques

Caractéristique des phénomènes qui produisent des défauts superficiels au cours de la coupe des métaux. Microgéométrie de la surface et état de la couche superficielle, éléments qui déterminent la qualité de la surface. Influence de la qualité de la surface sur les propriétés fonctionnelles des pièces et des ensembles des machines.

Rugosité affectant la surface et appareils pour la mesurer. Méthodes d'étude de la couche superficielle.

Caractéristique de la qualité de surface des ébauches à des étapes diverses de la production. Façons dont les divers procédés d'usinage interviennent sur la qualité de la surface.

Références pour désigner les états de surface en fonction des conditions d'exploitation.

Lors de la coupe des métaux, l'outil laisse à la surface usinée des traces sous forme de sillons orientés non seulement dans le sens de la coupe, mais également dans celui de l'avance. Il en résulte un état superficiel microgéométrique (fig. 69) déterminé par les propriétés du métal usiné, le processus de la formation du copeau, le régime de travail, le broutement produit par la coupe et par d'autres facteurs technologiques.

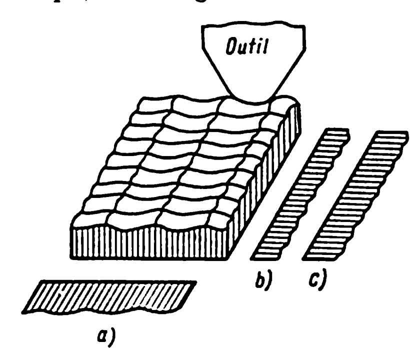


Fig. 69. Microgéométrie de la surface :

a — profil dans le sens de l'avance ; *b* — profil dans le sens de la coupe suivant le fond des creux ; *c* — profil dans le sens de la coupe suivant la ligne des crêtes

La microgéométrie ou la rugosité d'une surface subit l'action des phénomènes plastiques de cisaillement des couches sollicitées par le tranchant de l'outil lors de l'usinage de l'acier, et ceux de l'arrachement des fragments lors de la coupe des métaux cassants comme la fonte grise ou les alliages durs non ferreux. La formation des rugosités est favorisée par le frottement de la surface en dépouille de l'outil contre la surface usinée de l'ébauche, frottement qui s'accroît avec l'usure de l'outil. Les sillons et les stries sur la surface en dépouille de l'outil laissent également leurs empreintes sur la surface usinée. D'autre part, la microgéométrie de la surface dépend pour beaucoup de la vitesse de coupe et de l'avance.

L'arête rapportée qui se forme périodiquement près de l'arête tranchante, lorsque la vitesse de coupe de l'acier atteint des valeurs définies, contribue également à augmenter la rugosité de la surface ; avec l'augmentation de la vitesse la rugosité diminue car l'arête rapportée cesse de se former, le cisaillement du copeau devient plus

régulier à mesure que la température s'élève et l'outil n'arrache plus des fragments isolés de métal. Par contre, l'avance en augmentant renforce l'arrachement des couches du métal dégradant ainsi l'état de surface.

Le broutement engendré par le fonctionnement du système élastique machine-pièce-outil donne lieu à des vibrations normales à la surface usinée qui modifient périodiquement la position du tranchant par rapport à cette surface dans laquelle il se forme ainsi des creux et des bosses.

Les rugosités produites par des vibrations de fréquence élevée et de faible amplitude sont très variées quant à leur forme et dimensions; lorsque la fréquence est relativement faible et l'amplitude importante, la surface usinée devient irrégulière, ondulée (fig. 70). Cette hypothèse sur l'origine de l'irrégularité est étayée par la constance de la période ou de la longueur des ondes sinusoïdales qui représentent une sorte de trace des vibrations périodiques engendrées par le processus de la coupe.

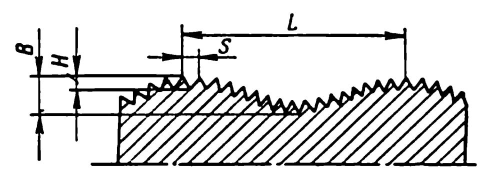


Fig. 70. Rugosité et ondulation de la surface usinée:

B — hauteur de l'ondulation; *L* — pas de l'ondulation; *H* — hauteur des rugosités; *S* — pas des rugosités

Les vibrations parallèles à la surface usinée interviennent également sur la formation des rugosités en provoquant notamment des arrachements périodiques des couches de métal plastiques au moment où le copeau se détache de la surface travaillée.

L'état de surface dépend encore de la dureté du métal et de la géométrie des outils.

La formation de la microgéométrie s'accompagne par celle d'une couche superficielle dont les propriétés physiques et mécaniques diffèrent de celles du métal à cœur. La pression de coupe et la chaleur dégagée décarbonisent partiellement la couche superficielle y provoquant la formation de criques. La couche superficielle des métaux plastiques (acier, cuivre, alliages d'aluminium) est en plus dans ces conditions le siège des modifications structurales importantes.

Ainsi, la qualité de surface est définie par l'ensemble des caractéristiques microgéométriques de la surface et de l'état de la couche superficielle.

La qualité de surface détermine pour beaucoup les propriétés fonctionnelles des pièces et des machines, et notamment leur résistance à l'usure, leur rigidité et leur tenue à la corrosion.

Dans les ajustements avec jeu, l'allure de l'usure primaire, c'est-à-dire du rodage des surfaces de frottement, est de même fonction de l'état de surface.

Pendant le rodage, la pression exercée par les rugosités des surfaces conjuguées chasse l'huile et provoque la rupture de son film ; il en résulte que même des pressions relativement faibles provoquent un frottement à sec qui produit le cisaillement des aspérités en saillie ; ce phénomène entraîne à son tour un travail de frottement renforcé. L'action abrasive des particules de métal coupé accélère encore l'usure des surfaces conjuguées dans la période initiale de travail. L'usure initiale accroît le jeu entre les surfaces conjuguées et la tolérance prévue se trouve compromise par rapport à sa valeur imposée. Les courbes de la figure 71 caractérisent l'usure d'un ajustement avec jeu. Le temps de fonctionnement de la conjugaison est

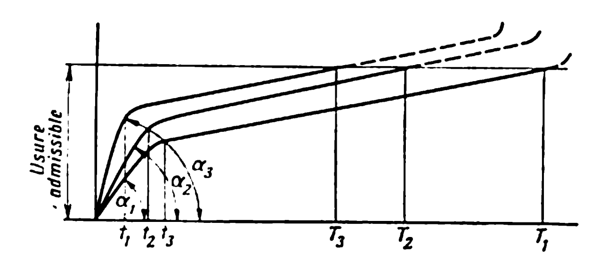


Fig. 71. Courbes de l'usure des surfaces lors d'un ajustement avec jeu

porté en abscisse, alors que l'usure et sa limite admissible, en ordonnée. L'usure initiale des trois surfaces au fini différent est caractérisée par les secteurs des courbes aux angles d'inclinaison α_1, α_2 et α_3, et par le temps de durée de l'usure t_3, t_2 et t_1. Dans les trois cas, l'usure d'exploitation est définie par le même angle d'inclinaison des courbes de l'usure propres aux matériaux et aux conditions de travail considérés.

Ainsi, la durée de service des couples T_1, T_2 et T_3 sollicités par le frottement jusqu'à la limite de l'usure admissible varie en fonction de l'état de surface. Pour diminuer au possible l'usure initiale et accroître la durée de service des pièces sans modifier les ajustements imposés, on recourt aux diverses méthodes d'usinage fin et d'achèvement des surfaces sollicitées par le frottement (tournage fin, rodage mécanique, superfinition, rodage, etc.).

L'usure des pièces mécaniques est définie non seulement par la microgéométrie de la surface, elle est également fonction des irrégularités et des défauts de forme macrogéométriques. L'action de ces derniers est d'ailleurs plus importante que celle de la rugosité.

Les transformations, dont la couche superficielle d'une pièce en usinage est le siège, interviennent également sur l'usure des surfaces en frottement.

Il arrive que les modifications de la couche superficielle dues à l'usinage favorisent la tenue à l'usure et la résistance des pièces mécaniques. Ainsi, en appliquant les méthodes de consolidation (galetage aux rouleaux et aux billes, grenaillage), on crée dans les couches superficielles des contraintes qui permettent d'augmenter la durée de service des pièces sollicitées par des charges alternatives.

La qualité de surface influe nettement sur la rigidité des ajustements avec serrage, et surtout des ajustements pressés, dont la réalisation prévoit telles ou telles destructions des couches superficielles des surfaces conjuguées, déterminées par leur état.

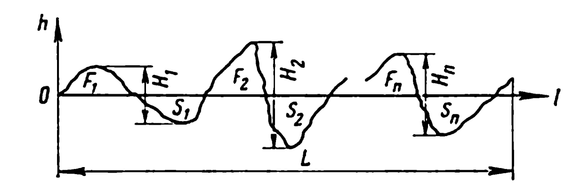


Fig. 72. Profil d'une surface

La microgéométrie de la surface et l'état physique de la couche superficielle, toutes les autres conditions étant égales, déterminent également la résistance de la pièce.

Les rugosités contribuent à la concentration des contraintes et à la formation des criques de fatigue, surtout dans le cas des charges alternatives, alors que la décarbonisation et autres défauts de la couche superficielle réduisent la limite de fatigue du métal.

L'étude de la tenue à la corrosion des surfaces métalliques a permis d'établir que la corrosion et sa progression sont plus rapides si les pièces sont usinées grossièrement et comportent des rugosités importantes surtout au droit de la concentration des contraintes. En améliorant l'état de surface on augmente la tenue des pièces à la corrosion.

Les normes soviétiques d'état de surface et de leur notation prévoient 14 classes, dont la 1re correspond au plus mauvais et la 14e au meilleur fini.

L'état de surface est défini par l'un des paramètres suivants: a) l'écart-type des rugosités $H_{ét}$ et b) la hauteur moyenne des rugosités H_{moy}.

L'écart-type des rugosités est défini par la racine carrée du carré moyen des distances des points du profil de la surface jusqu'à sa ligne médiane, c'est-à-dire jusqu'à la ligne qui divise le profil de façon (fig. 72) que les sommes des aires situées de part et d'autre de cette

ligne soinet égales (c'est-à-dire $F_1 + F_2 + \ldots + F_n = S_1 + S_2 + \ldots + S_n$)

$$H_{ét} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L h^2\, dl}. \qquad (98)$$

La hauteur moyenne des rugosités est donnée par la moyenne arithmétique des hauteurs des rugosités H depuis la crête jusqu'au fond du creux (fig. 72) ; pour calculer H_{moy} on ne tient pas compte des valeurs de H qui dépassent d'une façon évidente le cadre de la série :

$$H_{moy} = \frac{1}{n} (H_1 + H_2 + \ldots + H_n). \qquad (99)$$

Les méthodes les plus usitées et pratiquement les plus importantes pour apprécier l'état de surface sont : a) les méthodes optiques de définition du profil à l'aide d'un microscope binoculaire, d'un interféromètre ou d'un rugomètre de l'académicien V. Linnik ; b) le sondage du profil par l'aiguille d'un profilographe de B. Lévine, K. Ammon, etc., appareil permettant de reproduire le profil ; c) le sondage du profil par l'aiguille des profilomètres de V. Kisselev et d'autres, qui donnent directement des valeurs numériques définissant le profil en $H_{ét}$; d) la comparaison de la surface contrôlée avec celle des étalons correspondants ; e) l'étude des coupes des profils réels; f) l'examen des empreintes.

Le microscope binoculaire de l'académicien Linnik s'emploie essentiellement pour le contrôle des états de surface de 2e à 9e classe. Cet appareil qualifie l'état de surface en mesurant la hauteur maximale des rugosités. Pour le calcul de H_{moy} on prend généralement cinq mesures.

L'interféromètre Linnik assure le contrôle des surfaces finies de 9e à 14e classe. L'état de surface y est défini par la hauteur maximale des rugosités.

L'exploration par un interféromètre d'une surface comportant des défauts inégaux ou des traces d'usinage désordonnées rend la courbure des franges tellement chaotique que la mesure du profil devient impossible.

Le rugomètre Linnik permet de mesurer les surfaces au fini très poussé comportant des rugosités d'une forme quelconque et des traces d'usinage désordonnées, c'est-à-dire sans stries à orientation prédominante. Cet appareil détermine également l'état de surface en mesurant la hauteur maximale des rugosités.

Les *profilographes* s'emploient pour mesurer les rugosités par le procédé de sondage du profil à l'aide d'une aiguille, qui va de pair avec l'enregistrement d'une coupe de profil. Le domaine de leur application va de la 1re à la 11e et même à la 12e classe.

L'état de surface caractérisé par ces appareils est traduit par la hauteur maximale de rugosités déterminée par la hauteur H_{max} de la crête la plus haute à partir du creux le plus profond. Pratiquement, H_{max} et H_{moy} sont très proches quant à leur valeur. L'intégration graphique des coupes de profil permet également d'obtenir les écarts-types $H_{ét}$ des rugosités.

La figure 73 schématise le fonctionnement d'un profilographe. La pointe du palpeur *A* serré sur le patin qui porte également le miroir *M* explore la surface de la pièce *P* abloquée sur la platine *Pl* qui se déplace lentement. Le patin

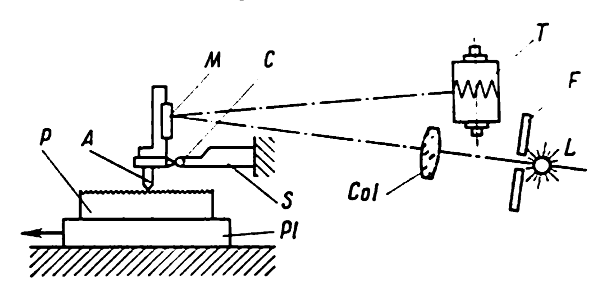


Fig. 73. Schéma de principe d'un profilographe

est asservi par une charnière *C* ou par un autre accouplement élastique au support *S* fixé à demeure. Un tel assemblage assure au palpeur un déplacement vertical suivant les aspérités de la surface mesurée. Le miroir *M* bloqué rigidement sur le patin effectue des mouvements oscillatoires définis également par les rugosités superficielles. Un rayon de lumière, émis par la source *L*, en passant par la fente *F* et la lentille collimatrice *Col* vient frapper le miroir *M* qui le réfléchit sur le tambour en rotation *T*, porteur de papier photosensible; la courbe tracée par le rayon de lumière est ainsi reproduite en figurant le profil de la surface mesurée; la courbe ainsi obtenue s'appelle « coupe de profil ».

Pour rendre clair l'enregistrement, les ordonnées de la courbe sont augmentées de 400 à 5 000 fois et même plus par rapport aux hauteurs réelles des rugosités en fonction de la construction et du réglage de l'appareil. Le grossissement vertical est réalisé par le système optique de l'appareil. Le grossissement horizontal est de beaucoup inférieur au précédent; la trajectoire réelle augmente en abscisse de 10 à 50 fois. Une différence aussi grande est prévue pour rendre commode la lecture. En effet, si l'on adopte un même grossissement de 5 000 X, par exemple, dans les deux sens, une trajectoire de 3 mm produirait une coupe de profil longue de 15 m. Le grossissement horizontal est réalisé par le rapport correspondant du mécanisme reliant les mouvements de la platine *Pl* et du tambour *T*.

Ainsi, une coupe de profil donne une image dénaturée du profil, mais par contre elle permet de définir la hauteur des rugosités avec la précision voulue.

L'inconvénient principal de ces appareils est le sondage impossible des creux étroits et profonds, car l'arrondi de la pointe du palpeur encore non émoussée varie de 1,5 à 12 μ.

Le *profilographe Ammon* explore la surface en la balayant par une tête porteuse d'un palpeur en diamant. Le point lumineux qui se déplace en fonction du mouvement du palpeur le long d'une graduation permet de définir de visu les hauteurs des rugosités. La trajectoire du point lumineux peut être enregistrée

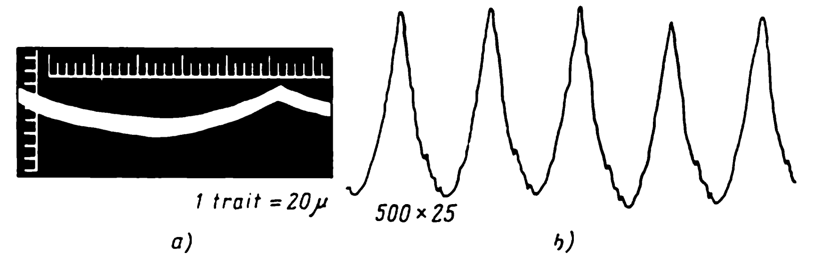


Fig. 74. Coupes de profil de la surface d'une pièce en acier, exécutée par tournage suivant la 3e classe d'état de surface, obtenues

a — au microscope binoculaire Linnik ; *b* — au profilographe Lévine

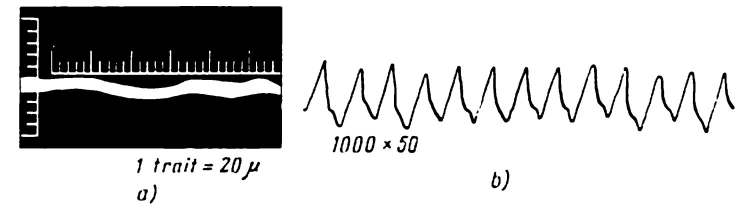


Fig. 75. Coupes de profil de la surface d'une pièce en acier, exécutée par tournage suivant la 6e classe d'état de surface, obtenues

a — au microscope binoculaire Linnik ; *b* — au profilographe Lévine

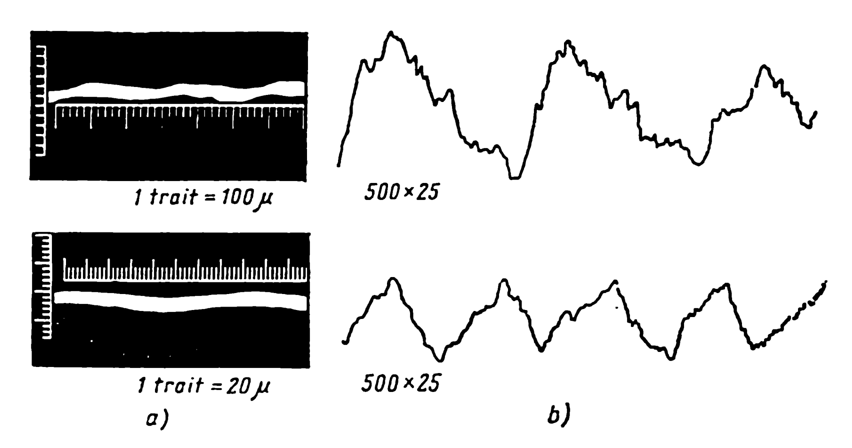


Fig. 76. Coupes de profil de la surface d'une pièce en acier, exécutée par surfaçage à la fraise suivant la 3e classe d'état de surface (en haut) et la 4e classe d'état de surface (en bas), obtenues

a — au microscope binoculaire Linnik ; *b* — au profilographe Lévine

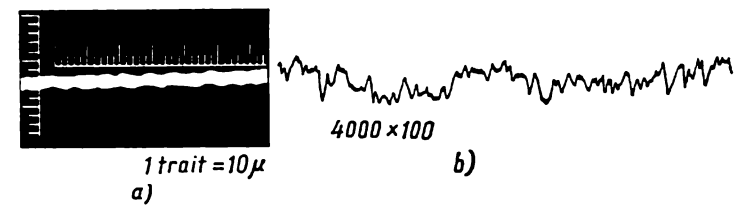


Fig. 77: Coupes de profil de la surface d'une pièce en acier rectifiée suivant la 8[e] classe d'état de surface, obtenues

a — au microscope binoculaire Linnik; *b* — au profilographe Lévine

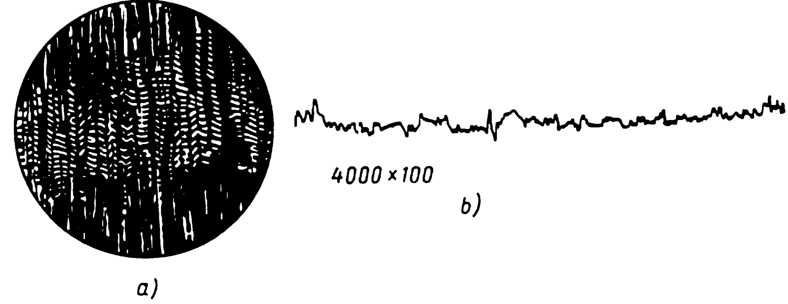


Fig. 78. Micrographie (*a*) et coupe de profil (*b*) de la surface d'une pièce en acier rectifiée suivant la 10[e] classe d'état de surface obtenue sur l'interféromètre Linnik et le profilographe Lévine

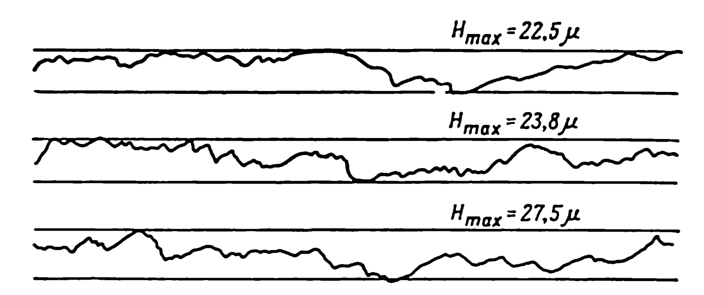


Fig. 79. Coupes de profil des surfaces de moulages d'acier obtenus par le procédé à cire perdue, enregistrées à l'aide du profilographe de l'Ecole technique supérieure Bauman de Moscou

sur le papier photosensible ou sur un film qui se déroule à vitesse constante dans une chambre spéciale de l'appareil, et fournit ainsi une coupe de profil. Le grossissement vertical de l'appareil est de 400 à 2 500 X, et le grossissement horizontal, de 10, 30 et 50 X, suivant la vitesse du déplacement de la tête porteuse. Dans les cas courants, les coupes de profil ainsi obtenues peuvent encore être grossies de 4 fois par photographie. Ainsi, l'image réelle peut être grossie de 1 600 à 10 000 fois dans le sens vertical et de 40 à 200 fois dans le sens horizontal.

Le profilographe Ammon permet de mesurer les défauts microgéométriques des pièces quelles que soient leurs dimensions, car il peut être monté près de la pièce. Il permet également la mesure des ondulations de la surface, car la longueur de la pièce explorée simultanément peut atteindre 125 mm.

Dans le cas de l'étude des métaux non ferreux et d'autres matériaux doux, la pression importante (de l'ordre de 5 g) exercée par le palpeur sur la surface explorée compromet l'image du profil, car le palpeur y laisse des traces relativement profondes.

Le *profilographe Lévine* (modèle IZP-17) est employé pour l'étude de la microgéométrie des plans, des surfaces cylindriques extérieures dans le sens de leur génératrice, et des surfaces sphériques extérieures de grand rayon.

Les coupes de profil qu'il permet d'obtenir peuvent donner un grossissement vertical allant de 250 à 5 000 X et un grossissement horizontal, de 25 à 50 X. La hauteur maximale des rugosités peut être également appréciée visuellement. Le corps de l'appareil comporte des dispositifs pour la fixation de petites pièces ainsi que pour le montage de l'appareil sur les surfaces à explorer de grosses pièces.

L'arrondi de la pointe du palpeur du profilographe IZP-17 est de 1,5 ou de 3,0 μ; la coupe de profil obtenue à l'aide d'un tel palpeur traduit avec une précision plus poussée les défauts microgéométriques de la surface étudiée.

La formation des stries à la surface explorée est impossible ici, car la pression exercée par le palpeur sur les pièces dégrossies varie de 0,05 à 2,2 g, et sur les pièces finies, de 0,007 à 0,25 g.

La longueur de la trajectoire examinée est de 1,5 à 3,0 mm; l'appareil ne peut donc pas s'employer pour l'étude des irrégularités de surface.

Un autre profilographe Lévine (IZP-5) est prévu pour des travaux de recherche dans le domaine de la définition du profil des étalons d'état de surface de 1re à 13e classe.

Le profilographe comporte un dispositif à microscope spécial pour l'exploration préalable de la surface de l'échantillon, le choix du secteur à étudier et le positionnement de la surface de l'échantillon dans un plan rigoureusement parallèle au plan du déplacement de la platine; la mise en place de la surface testée est ainsi très rapide; dans le cas de l'étude des surfaces superfinies, l'appareil permet de réaliser de 8 à 12 coupes de profil sur une feuille de papier 13 × 18 cm.

Le grossissement vertical du profilographe est de 500 à 13 800 X, son grossissement horizontal, de 25 à 500 X.

La pression infime exercée par le palpeur, qui varie de 0,004 à 0,25 g, permet d'employer l'appareil pour l'étude non seulement des échantillons métalliques mais aussi des matières plastiques et autres matériaux.

Les figures 74 à 78 représentent à titre d'exemple quelques coupes de profil exécutées à l'aide du profilographe Lévine et du microscope binoculaire Linnik, ainsi que la micrographie obtenue à l'aide d'un interféromètre Linnik.

Sur la figure 79 on peut voir les coupes de profil de la surface des moulages d'acier exécutés par le procédé à cire perdue, obtenues à l'aide du profilographe de l'Ecole supérieure technique Bauman de Moscou.

La figure 80 reproduit une micrographie de la surface d'une tôle d'aluminium fournie par le rugomètre Linnik.

Les *rugomètres* sont des appareils électrodynamiques prévus pour donner une caractéristique quantitative de la microgéométrie des surfaces des pièces mécaniques; la lecture est donnée par le cadran à aiguille gradué directement en H_{ht} (écart-type des hauteurs des rugosités par rapport à leur hauteur moyenne).

Les rugomètres explorent le profil à l'aide d'une aiguille qui balaye la surface étudiée.

Les rugomètres s'emploient généralement pour la vérification des surfaces de la 5e à la 12e classe.

Les rugomètres Kissélev peuvent être utilisés dans les conditions d'un atelier et d'un laboratoire. Il en existe deux modèles, KV-4 et KV-6. La précision assurée par KV-6, modèle plus récent, est plus élevée, alors que ses lectures sont plus stables.

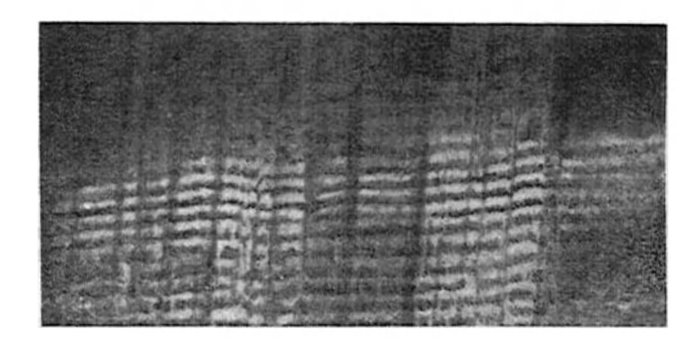


Fig. 80. Micrographie de la surface d'une tôle d'aluminium obtenue à l'aide d'un rugomètre Linnik

La *méthode de comparaison* de l'état de surface d'une pièce avec les étalons des états de surface, qui correspondent aux classes établies par les normes, est la méthode la plus simple et la plus rapide pour contrôler les pièces en fabrication dans un atelier. Après avoir acquis une certaine dextérité, les opérateurs manipulant des étalons bien exécutés peuvent assurer un contrôle assez sûr. A cet effet, les étalons doivent être fabriqués de même matériau que les pièces à vérifier, car l'aptitude à la réflexion du matériau (acier, fonte, alliages non ferreux, etc.) est un facteur important pour l'appréciation visuelle de l'état de surface. Il en est de même pour l'usinage des étalons, car l'aspect extérieur des surfaces exécutées par divers procédés (tournage, fraisage, brochage, rectification, etc.) varie pour les mêmes classes d'état de surface.

La hauteur des rugosités des étalons prévus pour le contrôle doit être maximale dans les limites admissibles imposées à la classe considérée par les normes. Cette condition rend plus facile la distinction des étalons des deux classes voisines.

Les étalons doivent être munis d'un livret caractérisant le matériau, le traitement thermique, le mode d'usinage, le régime de coupe, le liquide d'arrosage, les paramètres géométriques de l'outil employés pour leur exécution. Ces livrets guident l'agent de méthodes dans le choix du régime de coupe et d'autres conditions d'usinage nécessaires pour obtenir l'état de surface imposé.

La figure 81 représente un jeu d'étalons d'état de surface rangé dans une boîte à couvercle transparent, alors que la figure 82 représente ces mêmes éta-

lons fixés à un porte-étalon spécial. En maniant ces étalons il ne faut pas les toucher des doigts.

On peut également se servir en guise d'étalons de pièces mécaniques finies et vérifiées par un des procédés déjà décrits de l'étude directe de l'état de surface, ou de barres aux cotes respectives prélevées sur ces pièces.

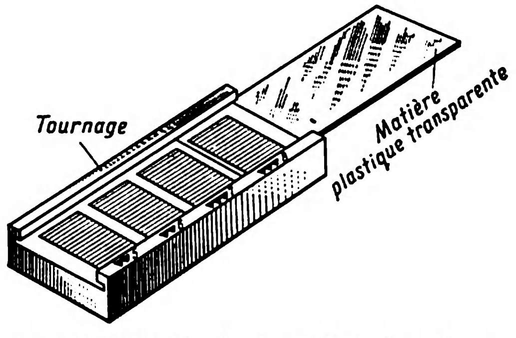


Fig. 81. Boîte des étalons d'état de surface

La méthode de comparaison, étant très commode pour l'appliquer dans un atelier, présente toutefois certains inconvénients. Une estimation visuelle est subjective et peut donner lieu à des controverses, surtout lorsqu'il s'agit de surfaces usinées par des procédés fins. Il est recommandé alors d'employer une loupe à grossissement 5 X ou un microscope de comparaison dans lequel la surface vérifiée et l'étalon sont projetés sur le champ d'un même oculaire divisé en deux parties égales.

Les étalons doivent être soigneusement conservés, il faut les manier avec précaution, car ils sont susceptibles de corrosion et très sensibles aux actions mécaniques.

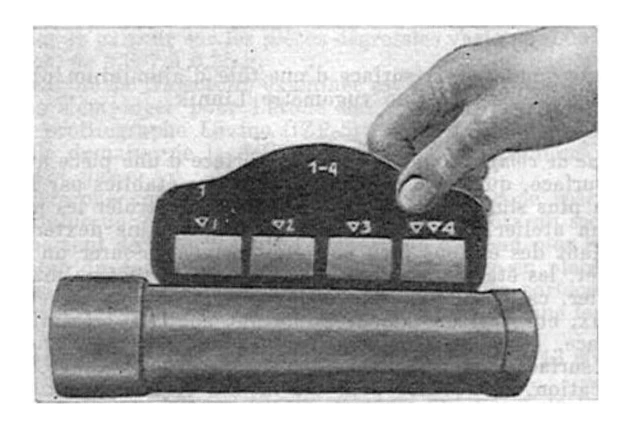


Fig. 82. Porte-étalon permettant de confronter en tournage l'état de surface des pièces et des étalons

Pour obtenir une caractéristique objective des états de surface par la méthode de comparaison avec les étalons il faut faire appel à des appareils correspondants. Ainsi, l'état de surface peut être apprécié par comparaison avec des étalons sur un appareil permettant d'obtenir une caractéristique indirecte quelconque relative à l'état de surface. Les réflectomètres, par exemple, permettent de mesurer et de comparer à l'aide d'une cellule photo-électrique l'in-

tensité de la lumière réfléchie par la surface à vérifier et l'étalon. Les appareils pneumatiques fonctionnent suivant le principe de la modification de la pression d'air dans le cylindre dont l'entrée et la sortie sont assurées par des trous de même grandeur ; en plaçant devant la sortie des surfaces aux rugosités différentes, nous changeons en quelque sorte sa section, ce qui se traduit par la modification de la pression dans le cylindre.

Une caractéristique supplémentaire de l'état de surface est donnée par la surface porteuse passant par la ligne des crêtes. Elle est mesurée par l'application à la surface étudiée d'un prisme de verre *P* (fig. 83). On peut alors distinguer nettement, sur la longueur totale du prisme *a*, les aires de contact réel

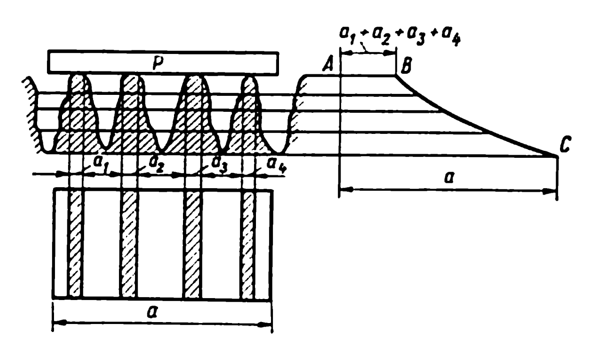


Fig. 83. Surface porteuse d'un profil

d'une longueur a_1, a_2, etc. A droite du dessin figure la courbe de la surface *ABC* qui donne la part du contact réel en fonction de la hauteur des rugosités, à mesure de la progression de l'usure, par exemple. La surface porteuse est définie par un appareil qui permet d'observer et de photographier les aires de contact du plan du prisme de quartz avec la surface étudiée. L'état de surface est ainsi évalué en appliquant d'abord l'appareil à l'étalon, et ensuite à la pièce à vérifier.

La *méthode des coupes de profil réelles* n'est appliquée que dans des travaux de recherche, car elle prévoit la destruction de la pièce ou de l'étalon.

Pour obtenir une telle coupe de profil, la pièce ou l'étalon sont coupés dans le sens nécessité par l'étude ; la surface de la coupe est ensuite polie suivant le procédé courant de la préparation des coupes pour la micrographie. Pour prévenir la formation des arrondis et d'autres défauts lors de l'exécution de la coupe, la surface étudiée est couverte d'une couche de chrome ou de cuivre. L'image du profil ainsi obtenu est grossie par projecteur ; elle peut être également obtenue par photographie avec un grossissement important ou étudiée à l'aide d'un microscope métallographique.

Si la coupe est perpendiculaire à la surface étudiée, l'échelle des abscisses et des ordonnées du profilogramme est la même. Lorsque le grossissement est important, la coupe de profil devient trop longue et rend l'étude incommode. La méthode des coupes obliques [1] est alors d'une grande aide. La mise en place de l'étalon pour obtenir une telle coupe est montrée sur la figure 84. Lorsque la partie *ABC* est tranchée, les arêtes *AC* ainsi formées sont rodées à la pâte GOI avec du kérosène et puis soumises à l'attaque. L'arête *C* est photographiée avec un grossissement 30 X ; on obtient ainsi une coupe de profil réelle dont le gros-

[1] La méthode des coupes obliques a été proposée en 1939 par le professeur et docteur-ingénieur P. Diatchenko.

sissement varie suivant la verticale ou l'horizontale. L'angle α est choisi de 0,5 à 2° de façon à réaliser suivant la verticale un grossissement supplémentaire de 30 à 120 X, car l'échelle

$$M = \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Ainsi, on peut obtenir dans le sens vertical un grossissement total de 900 à 3 600 X et dans le sens horizontal, de 30 X (grâce au grossissement rendu possible par la photographie).

Pour obtenir une telle coupe de profil sans détruire la pièce, on utilise la *méthode des empreintes*. Elle consiste à tirer une empreinte de la surface étudiée, qui par la suite est profilographiée par tel ou tel procédé. Cette méthode peut être appliquée non seulement dans un laboratoire, mais également dans les cas de très grosses pièces lorsqu'il est impossible de définir l'état de surface en plaçant directement les appareils sur la pièce, ou lorsqu'il faut étudier le profil dans un endroit difficilement accessible, dans un trou par exemple.

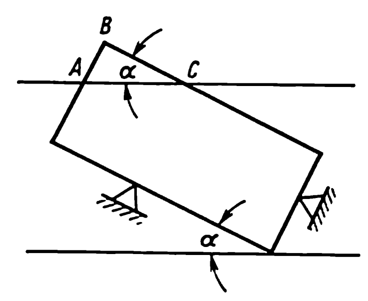


Fig. 84. Représentation schématique d'une coupe oblique

Pour obtenir des empreintes on utilise du celluloïd. Une lame de 10 × 40 × 2 mm est plongée pour deux minutes dans de l'acétone chimiquement pur et appliquée ensuite à la surface étudiée; après avoir posé sur la lame un morceau de papier noir on la presse avec un doigt (le papier noir rend la photographie meilleure). Après séchage, l'empreinte peut être photographiée avec un grossissement défini ou explorée par un des procédés déjà décrits; si on utilise un profilographe, la pression exercée par le palpeur doit être faible pour ne pas laisser des sillons. Il convient de ne pas oublier que le profil de l'empreinte est l'inverse de celui de la surface étudiée; donc, les crêtes de la coupe de profil correspondent aux creux de la surface et inversement.

La qualité de la surface est définie dans une grande mesure pa- l'état des *couches superficielles*. Voici les méthodes auxqu elles on re court pour les étudier.

La profondeur et les spécifications générales de la couche superficielle des pièces brutes ainsi que des pièces ayant subi les opérations d'ébauchage peuvent être établies par la méthode usuelle de l'étude des coupes micrographiques. La figure 85 représente la coupe d'un moulage d'acier réalisé par le procédé à cire perdue. La couche superficielle est décarburée presque jusqu'à la formation de la ferrite pure sur une profondeur de 0,15 mm. La même micrographie révèle des rugosités de l'ordre de 20 à 25 μ. La micrographie de la figure 86 montre la couche superficielle d'une ébauche en acier matricée à chaud; la couche décarburée de 200 μ ressort nettement de même que les rugosités dont la hauteur atteint jusqu'à 80 μ. Sur la figure 87 on peut voir la micrographie de la couche superficielle d'un acier calibré étiré à froid, qui rend évidente la couche partiellement dé-

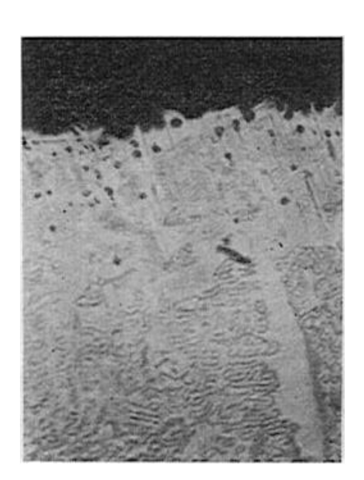


Fig. 85. Micrographie de la couche superficielle d'un moulage d'acier obtenu par le procédé à cire perdue

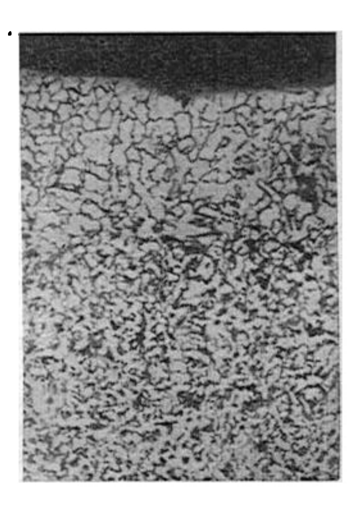


Fig. 86. Micrographie de la couche superficielle d'une ébauche en acier matricée à chaud

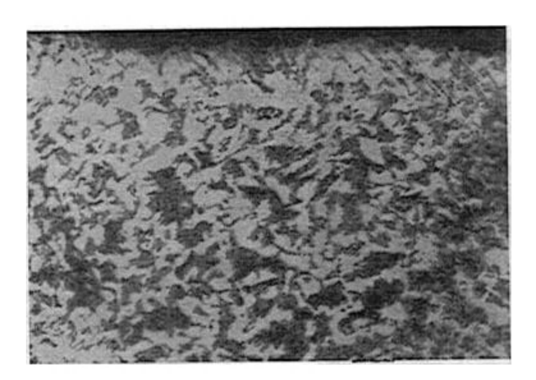


Fig. 87. Micrographie de la couche superficielle d'un acier calibré étiré à froid

carburée d'une profondeur de 70 μ et les aspérités de l'ordre de 40 à 50 μ.

La figure 88 donne la micrographie de la couche superficielle d'une ébauche en acier 20X3 matricée à chaud. La couche superficielle est nettement décarburée sur une profondeur de 225 μ. Pour rendre plus évidente l'allure de la décarburation, la figure 89 présente la micrographie de l'âme de cette ébauche.



Fig. 88. Micrographie de la couche superficielle d'une ébauche en acier 20X3 matricée à chaud



Fig. 89. Micrographie de l'âme de l'ébauche dont la couche superficielle est représentée sur la fig. 88



Fig. 90. Micrographie de la couche superficielle après tournage d'une ébauche en acier 20X3 représentée sur la fig. 88

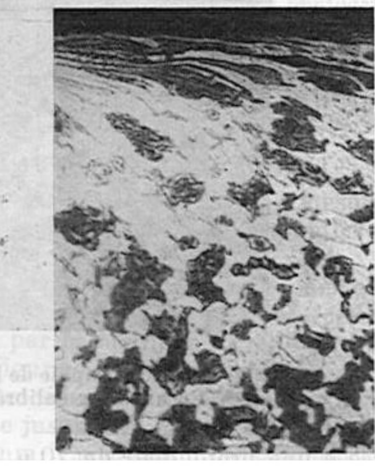


Fig. 91. Micrographie de la couche superficielle après tournage d'une ébauche en acier 45

L'exploration des micrographies permet également de mettre en évidence les déformations subies par les couches superficielles lors de l'enlèvement du copeau. Ainsi, la micrographie de la figure 90 présente la couche superficielle de la même ébauche en acier 20X3 après tournage ; on voit que cette couche a été sensiblement déformée et que sa structure a acquis un caractère turbulent ; la profondeur de la couche déformée est de 80 à 90 μ. Un autre exemple est fourni par la figure 91 qui représente la micrographie de la couche superficielle d'une ébauche en acier 45 après tournage ; la couche superficielle est nettement déformée sur une profondeur de 100 μ.

L'étude des micrographies peut être réalisée à l'aide de coupes droites et obliques. Pour obtenir la micrographie d'une coupe oblique on procède suivant le schéma de la figure 84. On sait qu'une coupe oblique permet de grossir l'image de la couche superficielle ; une coupe droite (perpendiculaire à la surface) ne s'emploie donc en principe que dans le cas d'une profondeur importante de la couche écrouie.

La couche superficielle peut être explorée également par des appareils prévus pour les essais de dureté à l'aide de la pyramide de diamant. On utilise dans ce but les appareils ПМТ-2 et ПМТ-3 du professeur M. Khrouchtchov et de E. Berkovitch. La pression appliquée à la pyramide varie de 1 à 500 g. Pour l'acier la pression recommandée est de 100 g.

La mesure de la dureté des coupes fournie par ces appareils permet de définir la profondeur et le degré d'écrouissage. Les coupes micrographiques utilisées à cet effet ne doivent pas subir le chromage, car le chrome diffuse dans la couche superficielle du métal, augmente sa dureté et compromet ainsi les lectures réelles de l'appareil. Une coupe oblique ne doit pas être exécutée par rectification, car la chaleur dégagée par ce mode d'usinage modifie les propriétés du métal. L'opération prévoit le polissage dans un dispositif spécial susceptible d'assurer à la coupe l'angle imposé. Le polissage s'effectue à la pâte GOI, d'abord à gros grain, puis à grain moyen et enfin à grain fin sur trois marbres successivement, dont le premier est en fonte, et les deux autres en verre. En mesurant la dureté de la partie oblique de l'échantillon depuis la surface jusqu'au métal de base, on définit la profondeur et le degré d'écrouissage ; la limite d'écrouissage est marquée par l'obtention des lectures de dureté identiques.

La couche superficielle peut être explorée également à l'aide de l'*analyse par radiographie*. Elle consiste à définir les contraintes internes de la couche superficielle en attaquant la surface de l'échantillon jusqu'à ce que soit enlevée une couche de 5 à 10 μ d'épaisseur, et en réalisant un radiogramme après chaque attaque.

Ce procédé demande l'emploi d'un équipement complexe et beaucoup de temps pour la réalisation et le dépouillement de chaque radiogramme.

La radiographie ne rend pas compte des modifications qui affectent les couches de métal d'une épaisseur inférieure à 3 ou 10 μ. On est obligé alors de faire appel à *l'étude structurale par diffraction des électrons* [1] qui rend possible l'exploration des couches superficielles très fines de divers matériaux.

La figure 92 montre les couches superficielles explorées à l'aide de la diffraction des électrons après leur rectification fine, rodage et superfinition. D'après l'analyse, les couches superficielles forment trois zones.

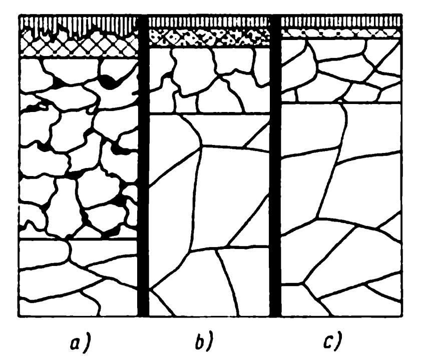


Fig. 92. Structures des couches superficielles d'un acier ayant subi les modes d'usinage suivants:
a — rectification fine; *b* — rodage; *c* — superfinition

La première zone d'une épaisseur de 2 à 3 Å [2] est constituée d'une pellicule de gaz condensée adsorbée qui ne peut être éliminée que par un échauffement de la surface dans le vide. Mais dès que la surface reprend le contact avec l'air, cette pellicule réapparaît instantanément.

La deuxième zone diffère suivant le mode d'usinage. Après la rectification fine elle atteint 80 Å ; elle est constituée alors de grains d'oxydes de nitrures, dont la cohésion est relativement faible, et de grains de métal décarburé par les températures élevées produites par la rectification. Le rodage réduit cette zone à 30 Å environ; elle est formée de grains d'abrasif, d'oxydes et de poussière; après la superfinition, son épaisseur est de 15 Å, la couche est alors composée de particules d'oxydes et de poussière.

Après la rectification fine, la troisième zone s'étend sur 50 000 Å environ ; elle est constituée de grains de métal, déformés par la pression de la meule, et de carbures qui se sont dégagés sous l'action des températures élevées. En se disposant à la périphérie des grains, ces derniers rendent la couche fragile. Le rodage et la superfinition réduisent la troisième zone à 15 000 Å ; elle est composée alors de grains de métal déformés. A mesure que la profondeur augmente, la troisième zone se transforme progressivement en une zone qui marque le

---

[1] La diffraction des électrons est le phénomène de la dispersion d'un flux d'électrons par les atomes, molécules, corps amorphes ou cristallins avec formation dans certaines conditions de plusieurs faisceaux nettement délimités.

[2] Å, angstrœm (mesure métrique de longueur); 1 angstrœm est égal à un dix-millionième de millimètre.

passage des couches déformées à celles où les cristaux de métal ne sont pas atteints par l'usinage.

Pour étudier la couche superficielle d'un métal, en laboratoire on recourt également à la méthode d'attaque des couches suivie de mesure de la dureté après chaque attaque, et à la méthode de mesure de l'épaisseur de la couche écrouie en fonction de la vitesse avec laquelle le métal est enlevé par l'attaque, etc.

D'après les recherches, la base de la couche superficielle des surfaces usinées des ébauches et des pièces mécaniques se situe en fonction des défauts de forme macrogéométriques de la surface, de ses irrégularités et de ses aspérités.

Le rôle technologique de la qualité des surfaces brutes de même que des surfaces usinées est assez important ; elle définit la valeur des surépaisseurs, les régimes de coupe, le défaut de la mise en place des ébauches. Cette action a été partiellement examinée lors de l'étude du défaut de la mise en place, et nous y reviendrons encore dans notre exposé. Pour le moment nous allons nous borner à donner une caractéristique générale de la qualité des surfaces brutes, en premier lieu, et façonnées par divers modes d'exécution ensuite.

Les cylindres de laminage laissent des empreintes de leurs défauts superficiels à la surface des produits ; l'usure des cylindres se traduit donc par une altération des surfaces laminées ; suivant l'auteur, la hauteur des rugosités des laminés ne dépasse pas généralement 150 μ. La couche superficielle des laminés est décarburée sur une épaisseur de 150 μ.

Les rugosités de l'acier étiré à froid diminuent jusqu'à 40 ou 50 μ ; lors de l'étirage la couche décarburée s'allonge et c'est pourquoi son épaisseur ne dépasse pas généralement 50 μ.

La hauteur des rugosités des pièces forgées est définie par les modes de forgeage. Les défauts de surface les plus grossiers (1,5 à 4 mm) apparaissent lors d'un forgeage libre. Les surfaces des pièces matricées à chaud portent les traces des pailles et les repliques des défauts de forme des matrices ; la hauteur des rugosités varie de 150 à 500 μ en fonction du poids des pièces et de l'état des matrices. La couche superficielle des pièces de forge est constituée d'une zone décarburée et d'une zone intermédiaire partiellement décarburée. La profondeur de la décarburation des ébauches matricées à chaud varie en fonction du poids de 150 à 300 μ ; lors du forgeage libre, l'épaisseur de la couche décarburée peut être plus grande et varier suivant le poids de 500 à 1 000 μ.

Les surfaces des pièces coulées reproduisent plus ou moins la forme des surfaces des moules. Les surfaces des pièces réalisées par moulage en sable à la main sont les plus grossières. Les aspérités superficielles de petites pièces atteignent dans ce cas 500 μ et de grosses, 1 500 μ ; leur importance est déterminée par la dimension des

grains de sable, l'intensité de serrage du moule, le soin que l'on prend pour son achèvement, et d'autres facteurs. Pour le moulage en sable mécanique, la hauteur des rugosités est de l'ordre de 300 μ ; pour le moulage en coquilles et la coulée centrifuge, de 200 μ; pour la coulée sous pression, de 5 à 10 μ.

Les particularités de la confection des moules pour le moulage à cire perdue permettent de produire des pièces dont les rugosités ne dépassent pas les limites comprises entre 8 et 40 μ.

Les ébauches en fonte grise venues de fonderie possèdent généralement une croûte perlitique d'une épaisseur de 300 μ [1] (zone perlitique) suivie d'une zone à teneur élevée de ferrite se transformant progressivement en structure de matrice (zone de transition).

La couche superficielle des moulages d'acier est constituée en général d'une zone décarburée de 200 μ d'épaisseur suivie d'une zone de transition à décarburation partielle.

Le façonnage de l'acier par enlèvement du copeau fait apparaître trois zones :

a) zone de déformation brutale, caractérisée par un réseau cristallin perturbé, des grains broyés, une structure turbulente et une augmentation brusque de microdureté ;

b) zone de déformation caractérisée par des grains étirés, le chevauchement de certains grains et la diminution importante de la microdureté par rapport à la couche sus-jacente ;

c) zone de transition, c'est-à-dire zone d'influence de la déformation qui s'atténue progressivement pour aboutir à la matrice.

Il arrive que le travail de la fonte grise donne lieu à une faible déformation du métal qui se produit sur une profondeur n'allant pas au-delà de 15 μ.

Les états de surface résultant de l'enlèvement du copeau varient largement en fonction des modes et des régimes d'usinage, de la géométrie de l'outil et de l'achèvement d'affûtage de l'arête tranchante.

La qualité de la surface usinée est définie surtout par les conditions d'usinage. L'effet des régimes de coupe sur l'état de surface des pièces en acier est traduit par les données suivantes.

La rugosité s'accroît lorsque les vitesses de coupe favorisent la formation de l'arête rapportée. La hauteur des rugosités H_{moy} devient maximale à des vitesses de 15 à 20 m/mn. Avec l'augmentation de la vitesse, les autres paramètres restant les mêmes, l'état de surface s'améliore pour se stabiliser à des vitesses supérieures à 100 ou 150 m/mn.

L'allure générale de la relation entre l'état de surface et la vitesse de coupe est matérialisée par la figure 93 dont la ligne *ab* marque

[1] Dans les expériences réalisées par l'auteur, l'epaisseur de la couche perlitique atteignait dans des cas particuliers 420 et 540 μ, mais en principe, elle variait de 140 à 320 μ.

la limite au-dessus de laquelle la hauteur des rugosités est définie par la formation de l'arête rapportée, alors qu'au-dessous cette hauteur est fonction d'autres facteurs.

La vitesse allant en augmentant, la couche écrouie augmente également en profondeur et diminue lorsque les vitesses de coupe dépassent 200 m/mn.

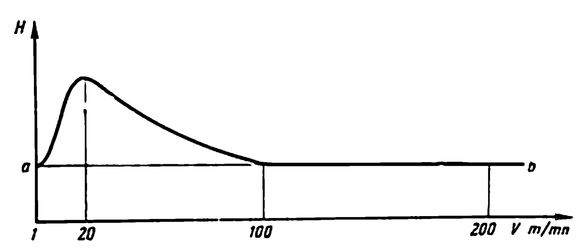


Fig. 93. Courbe d'état de surface en fonction de la vitesse de coupe

Le perçage à des vitesses de 15 à 25 m/mn, le lamage et le chambrage à la fraise à des vitesses de 20 à 35 m/mn altèrent l'état de surface ; le meilleur état de surface s'obtient par alésage à la vitesse de 4 à 5 m/mn.

La figure 94 représente une courbe expérimentale de l'influence de l'avance longitudinale sur l'état de surface obtenu en tournage

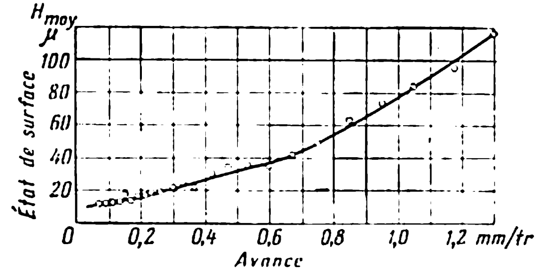


Fig. 94. Influence de l'avance longitudinale sur l'état de surface en tournage (acier 45)

de l'acier de construction 45 avec un outil à obliquité du profil de 45° et à l'arrondi du nez de 2,5 mm, à une vitesse de coupe v = 50 m/mn et une profondeur de coupe p = 0,5 mm. En augmentant l'avance la profondeur écrouie s'accroît.

Les données expérimentales autorisent à considérer que la profondeur de coupe n'influe pas sur l'état de surface [1]. La profondeur et le

[1] Les expériences ont été effectuées pour une profondeur de coupe de 0,5 à 5 mm. L'auteur n'a pas monté d'expériences pour des épaisseurs de coupe plus grandes et ne dispose pas de données expérimentales établies par d'autres chercheurs.

taux d'écrouissage ne changent pas non plus avec la modification de la profondeur de coupe.

Toutefois, la profondeur peut intervenir lorsqu'on s'attaque à la zone d'écrouissage des métaux plastiques qui s'est formée au cours de l'opération précédente. Dans ces conditions l'état de surface est meilleur que celui d'une pièce dont la surface n'a pas été écrouie lors d'un usinage antérieur. Par ailleurs, une dureté accrue du métal façonné améliore l'état de surface et réduit la profondeur de l'écrouissage.

Un choix judicieux du liquide d'arrosage peut améliorer nettement l'état de surface et augmenter la durée de l'outil.

La géométrie de l'outil influe également sur l'état de surface. Suivant les données expérimentales, ce dernier est pour beaucoup défini par le rayon d'arrondi de l'outil. La valeur de l'angle de pente intervient elle aussi sur l'état de surface. Ce dernier est également influencé en partie par l'angle de dépouille qui définit la surface de frottement de l'outil avec la surface usinée de l'ébauche. Les variations de l'obliquité du profil entre 30 et 60° dégradent quelque peu l'état de surface, de même que l'augmentation de l'angle d'arête de coupe frontale.

Les rugosités de l'arête tranchante sont reproduites sur la surface usinée ; cette action est rendue surtout évidente par la finition avec des outils à arête tranchante large, comme les pelles, les alésoirs, les broches. L'émoussage de l'outil est défavorable pour le fini de la surface usinée. L'état de surface déterminé par les propriétés du matériau en œuvre, la géométrie de l'outil et les phénomènes de la formation du copeau, est également influencé par la rigidité du système machine-pièce-outil. La rigidité de la machine et de l'outil étant constante, l'état de surface est déterminé par les particularités fonctionnelles et les rapports dimensionnels des ébauches, ainsi que par la rigidité de leur ablocage. L'état de surface d'un arbre monté en l'air (fig. 95, *a*) dégrade à mesure qu'on s'approche de l'extrémité libre ; lors du tournage entre pointes avec une contre-pointe tournante (fig. 95, *b*) dans le cas d'une longueur ne dépassant pas 15 diamètres (*d*), l'état de surface dégrade à mesure qu'on s'approche de la contre-pointe, alors que pour une longueur plus grande, il dégrade depuis la contre-pointe jusqu'au milieu de la pièce pour s'améliorer ensuite jusqu'à la poupée. Il en est à peu près de même lorsqu'un arbre est monté entre mandrin et contre-pointe tournante (fig. 95, *c*) ; mais dans ces conditions, pour un arbre plus long que 15 *d*, l'état de surface observé est mauvais surtout à la distance de 0,4 de la longueur de l'arbre à partir du bout maintenu par la contre-pointe ; cette caractéristique de l'état de surface ne concerne pas le milieu de l'arbre. L'état de surface est absolument le même lorsqu'un des bouts de l'arbre est serré sur un mandrin (fig. 95, *d*) alors que l'autre est porté

par une lunette. Ainsi, les variations de l'état de surface obtenu par tournage dans des conditions d'usinage constantes ne dépassent pas les limites établies par une classe ou parfois par deux classes voisines.

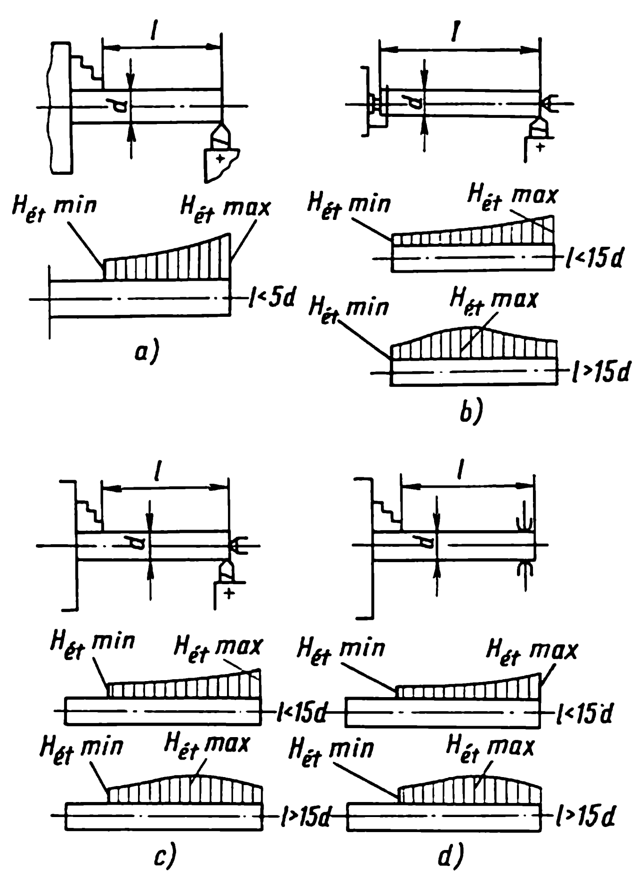


Fig. 95. Ablocages schématisés des arbres et épures des valeurs de $H_{ét}$ dans le sens de leur longueur

C'est là un témoignage du fait qu'il est très difficile de réaliser dans les conditions d'un atelier des états de surface limités par des spécifications très rigoureuses.

La dimension transversale (diamètre) n'influe pas sur l'état de surface (fig. 96). Des expériences ont été montées pour observer l'usinage des ébauches épaulées aux mêmes régimes de coupe pour tous

les matériaux étudiés. Des expériences analogues ont été réalisées pour la rectification, qui ont confirmé la thèse énoncée (fig. 97).

En rectification, l'état de surface est déterminé surtout par le grain de la meule (l'état de surface s'améliore avec l'élévation du numéro du grain) ; la vitesse circonférentielle de la meule qui est également proportionnelle à l'état de surface ; la vitesse de rotation (du déplacement) de l'ébauche (plus cette vitesse est grande, plus l'état de surface est mauvais); la profondeur de la rectification (plus elle est faible, plus la surface est bonne) ; la rectification à l'enfilade rend meilleur l'état de surface.

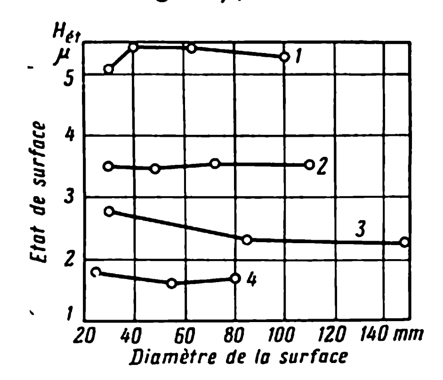


Fig. 96. Etats de surface en fonction du diamètre de l'ébauche usinée: courbe 1 — alésage d'un acier 45 ; courbe 2 — tournage d'un acier 45 ; courbe 3 — tournage d'un bronze ; courbe 4 — tournage d'une fonte

Si nous connaissons la façon dont les modes d'usinage interviennent sur la qualité de surface, nous pouvons réaliser des conditions qui permettent d'obtenir un état de surface imposé.

A cet effet les agents de méthodes font appel à des références établies sur la base de données expérimentales. Ce sont, entre autres, des nomogrammes comme celui représenté sur la figure 98, qui donnent les états de surface approximatifs en fonction des régimes de coupe.

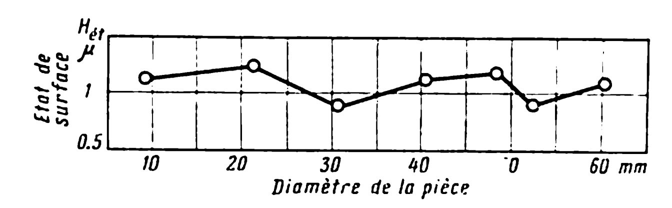


Fig. 97. Etat d'une surface rectifiée en fonction du diamètre de la pièce

Pour se servir d'un nomogramme, il faut retenir qu'il donne des valeurs approximatives relatives à une ébauche façonnée avec des outils sortant d'affûtage à rayon d'arrondi du nez variant de 2,0 à 3,0 mm ; l'acier 45 est usiné avec arrosage par une émulsion, la fonte et le bronze, sans arrosage. Avec l'émoussage de l'outil, l'état de surface dégrade de 15 à 20 % ; lors de l'exécution des alésages, il baisse d'une classe.

Pour que l'état de surface corresponde à celui indiqué par le nomogramme, le système machine-pièce-outil doit avoir une rigidité suffisante.

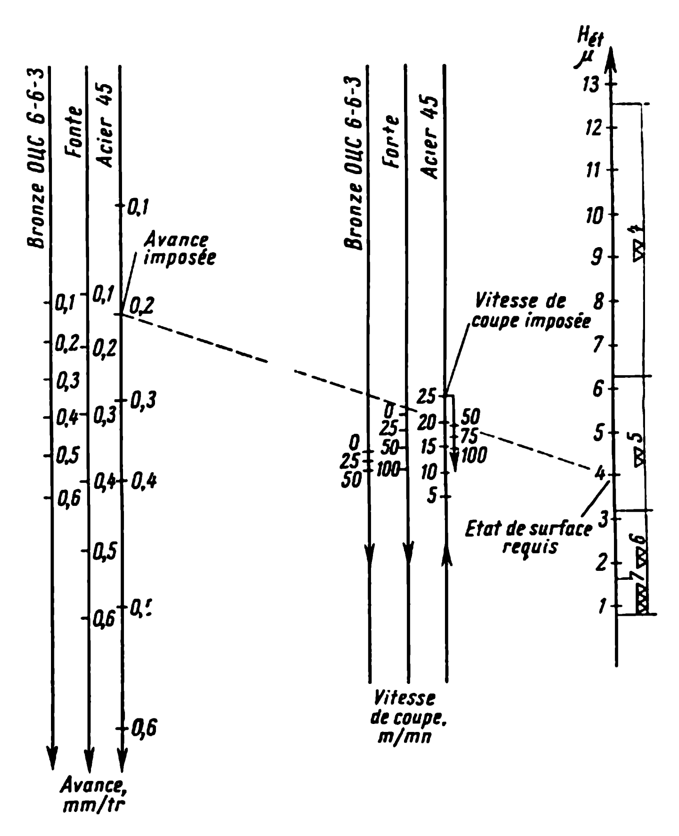


Fig. 98. Nomogramme définissant l'état de surface $H_{ét}$ en tournage de finition

La classe de l'état de surface est désignée par un agent d'étude qui ne doit pas choisir des spécifications trop serrées pour ne pas rendre trop compliquée la gamme d'usinage.

Il existe une relation technologique entre la précision d'usinage et l'état de surface ; les modes d'usinage précis assurent en même temps un bel état de surface, alors que les procédés d'ébauchage ne permettent pas de réaliser une précision poussée et donnent une surface plus grossière [1]. L'agent de méthodes a tout l'intérêt de traduire

[1] Voir Annexes 5a et 5b.

cette relation en prescriptions imposées par le dessin d'exécution de la pièce [1].

Il arrive, cependant, que l'état de surface doit être très bon, bien qu'une précision poussée ne soit pas nécessaire; on recourt alors à la superfinition ou au polissage qui n'élèvent pas la précision; lorsque les spécifications d'état de surface ne sont pas très rigoureuses, on utilise la rectification simple qui également améliore quelque peu la précision.

Pour choisir la classe d'état de surface on peut se guider aussi par des indications générales suivantes.

Pour les surfaces non conjuguées des pièces en fonte et en acier, usinées seulement pour réaliser les cotes d'encombrement et enlever l'excédent de matière, la 4e et même la 3e classe sont suffisantes; dans le cas analogue des alliages de métaux non ferreux il est d'usage d'employer la 5e classe.

Si des pièces peu importantes ne sont pas sollicitées par de fortes tractions et des vibrations en service, alors que leurs cotes sont choisies d'après des considérations fonctionnelles et assurent une grande marge de sécurité, elles peuvent être exécutées suivant la 4e ou 5e classe d'état de surface.

L'état des surfaces extérieures des pièces en acier peu chargées ne doit pas être inférieur à la 5e classe.

Pour des assemblages mobiles à court déplacement rectiligne à faible vitesse et sous faible charge, ainsi que pour des assemblages fixes importants on impose la 5e classe d'état de surface.

Les pièces en rotation (portées des arbres, bagues) qui travaillent sous faible charge et à vitesses peu importantes, ainsi que les pièces peu importantes sollicitées à la traction, peuvent être exécutées suivant la 7e classe d'état de surface.

Pour les pièces animées d'un mouvement de rotation qui travaillent à de grandes vitesses, pour les pièces importantes sollicitées à la traction (boulons de serrage des moteurs, par exemple), pour les segments d'étanchéité, les assemblages mobiles à déplacement rectiligne à grande vitesse et sous charge élevée, il convient de choisir la 8e classe d'état de surface.

Les surfaces des appuis et des manetons très chargés, ainsi que des portées des arbres et des barres d'alésage qui comportent des garnitures, doivent être usinées suivant la 9e ou 10e classe.

Pour les assemblages mobiles travaillant dans les conditions des vitesses et des pressions élevées, les 11e, 12e et même 13e classes sont de rigueur.

---

[1] L'Annexe 5c donne des références pour guider le choix de l'état de surface en fonction de la tolérance imposée à la cote prévue.

Ces indications doivent être considérées comme approximatives, expérimentales. Pour chaque matériau il doit exister, par ailleurs, un état de surface optimal conforme à la destination et aux conditions d'exploitation de la pièce, qui élève la tenue du métal à l'usure. Une question se pose donc tout naturellement, celle de la tenue à l'usure de la couche superficielle qui pendant l'exploitation est la première à subir la destruction.

La théorie de l'état de surface, forte des acquis de la science et de la technique modernes, aboutira sans aucun doute à résoudre les problèmes qui se posent devant elle. L'essor de l'atomistique, notamment, permet de s'attaquer au problème de la consolidation de la couche superficielle des pièces et de la modification des propriétés mécaniques et chimiques du métal par irradiation.

CHAPITRE III

Modes de fabrication en construction mécanique

§ 1. Modes de fabrication des pièces mécaniques

But et caractéristique générale des modes de fabrication des pièces mécaniques.
Pièces mécaniques en métal. Ebauches des pièces mécaniques.
Laminés. Utilisation des profilés. Application de l'étirage des profilés. Modes de dressage et de débitage des laminés.
Pièces de forge. Modes de leur fabrication: forgeage libre, forgeage en matrices volantes et en matrices fixes. Modes de calibrage des pièces matricées. Domaines d'utilisation des presses verticales à forger, des machines à rétreindre, des machines à cintrer horizontales et des laminoirs à forger.
Pièces mécaniques fabriquées par formage à froid et estampage des tôles. Modes de travail et domaines de leur application.
Pièces de fonderie. Modes de fabrication des ébauches et des pièces mécaniques par moulage en terre, en sable en châssis, par moules à noyaux, par moules permanents (coquilles), par centrifugation, par injection à cire perdue, en carapace.
Usinage des ébauches. Modes d'usinage.
Usinages physico-chimiques. Modes d'usinage électro-chimique et par étincelage.
Usinage par ultra-sons.
Nettoyage des pièces mécaniques et des ébauches au cours d'usinage.
Traitements thermiques et thermo-chimiques. Caractéristiques sommaires et domaines d'application des traitements thermiques. Notions sommaires sur la déformation de l'acier lors du traitement thermique.
Exécution des revêtements. Description sommaire et destination des revêtements galvaniques, de la métallisation par pulvérisation, des vernis. Graissage des pièces.
Correction des ébauches rebutées en fabrication des pièces mécaniques.
Pièces mécaniques en cermet. Modes de leur fabrication.
Pièces mécaniques en matières plastiques. Modes de leur fabrication. Particularités de la coupe des matières plastiques.

Pour guider le choix des modes de fabrication nous allons donner leur définition précise et indiquer les domaines de leur application.

L'objectif de la définition des modes de fabrication des pièces mécaniques est d'orienter l'agent de méthodes dans le choix de la gamme d'usinage en fonction des conditions de la production considérée. Nous ne traiterons pas du contenu de ces procédés, car il doit être déjà connu des cours déjà enseignés. Nous ne nous bornerons donc qu'à spécifier les niveaux de précision propres à chaque mode.

Malheureusement, il est impossible d'examiner les problèmes de la quantité de travail et du rendement en fonction des modes

de fabrication variés, car pour le même mode de fabrication ces facteurs changent sur une large échelle en fonction de plusieurs spécifications (configuration, dimensions, poids de la pièce, etc.).

Nous indiquons donc dans la mesure du possible les domaines d'application des modes considérés et donnons des renseignements qui pourront être utiles pour le choix de ces modes et la rédaction des gammes d'usinage, travail qui doit associer nécessairement les paramètres d'exécution des ébauches avec leur usinage ultérieur.

Nous allons donc définir les modes d'exécution des ébauches compte tenu de cette association.

Avant d'aborder notre exposé sur les modes de fabrication, voici quelques définitions.

Une *ébauche* est une pièce coulée, forgée ou laminée qui pour être finie doit subir un usinage ultérieur. Avant l'usinage on lui donne le nom de *pièce brute.*

Une pièce peut être obtenue non seulement par usinage sur des machines-outils, mais aussi directement par moulage ou formage sous pression, si ces méthodes permettent d'obtenir une pièce tout à fait identique à celle imposée par le dessin.

Une billette étirée prévue pour le forgeage libre de grosses pièces, une pièce de profilé débitée pour le forgeage libre ou pour l'estampage s'appellent *ébauches brutes.*

A. Pièces mécaniques en métal

Le choix d'une ébauche pour la fabrication d'une pièce prévoit l'analyse :

a) de la forme, des dimensions et du poids ;

b) du matériau imposé en relation avec les spécifications auxquelles doit satisfaire la pièce (rigidité, tenue à l'usure, etc.) ;

c) du nombre des ébauches à fabriquer ;

d) de l'orientation avantageuse des fibres du métal qui définit pour les pièces forgées l'ordonnancement de l'usinage ;

e) de la précision d'exécution et de la qualité de surface de l'ébauche.

Laminés

En construction mécanique les laminés s'emploient comme matière d'œuvre pour forger les pièces, ainsi que pour l'usinage par enlèvement du copeau sur des machines-outils.

Pour transformer directement les laminés en pièces, on emploie des barres calibrées et de l'acier laminé à chaud d'une précision accrue et courante.

Les barres calibrées de 3 à 30 mm de diamètre sont sorties suivant la 2*a* classe d'état de surface, de 3 à 65 mm de diamètre suivant

la 3e ou 3*a* classe et de 3 à 100 mm, suivant la 4e ou 5e classe d'état de surface. Les barres qui viennent se fixer dans des pinces doivent avoir un état de surface de 5e classe. Les barres calibrées de 4e classe et des classes plus élevées sont directement rectifiées sans subir l'usinage à l'outil de coupe.

Les diamètres des ronds d'acier de précision laminés à chaud s'échelonnent de 5 à 150 mm ; lorsque leurs cotes diamétrales ne dépassent pas 50 mm, les tolérances imposées assurent à peu près la 8e classe de précision ; de 50 à 125 mm la 9e classe, et de 130 à 150 mm une classe encore plus basse ; les cotes diamétrales des ronds d'acier laminés à chaud aux tolérances normales varient de 5 à 250 mm ; leurs classes de précision approximatives vont de la 9e (jusqu'à 95 mm) aux classes plus basses pour les cotes comprises entre 100 et 250 mm. L'ébauchage d'un acier laminé à chaud est réalisé à l'outil de coupe soit à partir des ébauches tronçonnées, soit directement à partir d'une barre.

Il est fréquent que la forme imposée soit obtenue en utilisant comme matière d'œuvre des carrés, hexagones, plats, cornières et autres profilés d'acier, ainsi que des tubes sans ou avec soudure.

Dans les conditions d'une fabrication en très grandes séries et de masse (machines agricoles, wagons, automobiles) il est avantageux d'utiliser des profilés spéciaux (fig. 99) susceptibles de réduire au minimum l'usinage dont le but n'est que d'assurer le tronçonnage, le perçage des trous et l'ébavurage. Lorsque les prescriptions techniques imposent pourtant le façonnage de certaines surfaces des profilés, le copeau à enlever ainsi que le temps d'usinage sont nettement réduits.

Pour fabriquer des pièces de précision à partir des laminés, on fait appel à l'*étirage à froid* qui diminue le volume d'usinage par enlèvement de copeau. Ce procédé permet d'obtenir un profil conforme à celui de la pièce finie ; les tolérances réalisées dans ces conditions peuvent être si serrées qu'il n'est pas nécessaire de procéder à la coupe ultérieure.

La figure 100 représente les opérations successives de l'étirage d'un plat dont le but est d'obtenir un demi-rond pour clavettes disque. La figure 101 montre l'étirage de ce demi-rond à partir d'un rond, et la figure 102, l'étirage d'un profilé à partir d'un rond.

L'étirage à froid est un mode de fabrication des profilés peu coûteux et à rendement élevé qui permet de réaliser une économie importante de métal. Ainsi, le débit du métal par clavette disque est de 9,6 g pour l'étirage de la barre à partir d'un plat rectangulaire d'acier 45 avec tronçonnage ultérieur sur des presses et rectification des plans, et de 13,8 g pour son exécution par enlèvement de copeau ; l'économie par pièce est donc de 4,2 g, ce qui constitue plus de 30 %. Dans ces conditions le rendement s'accroît de plus de 3 fois. De plus,

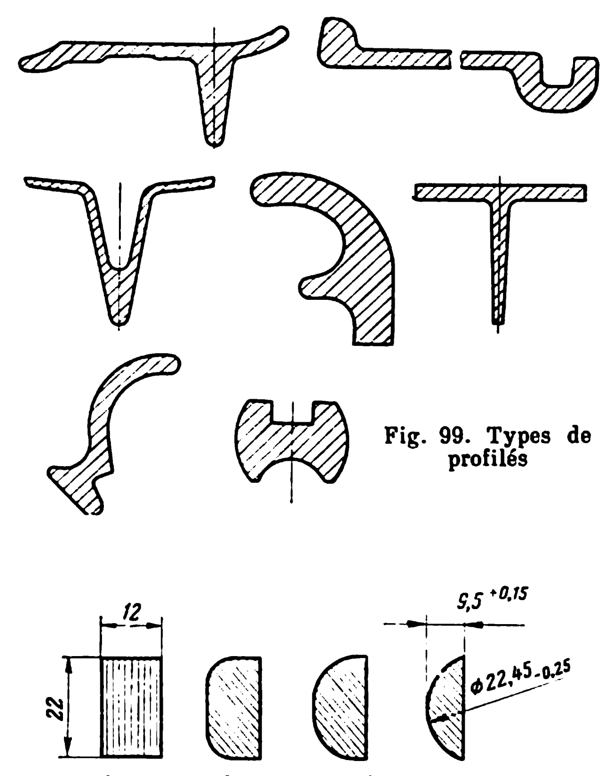


Fig. 99. Types de profilés

Fig. 100. Etirage d'un plat d'acier pour l'obtention des clavettes disque

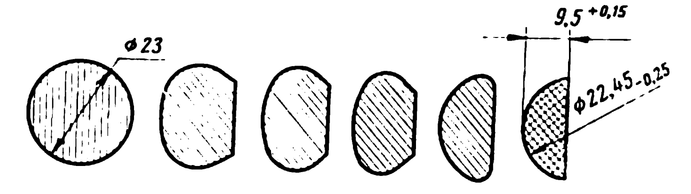


Fig. 101. Etirage des barres d'acier pour l'obtention des clavettes disque

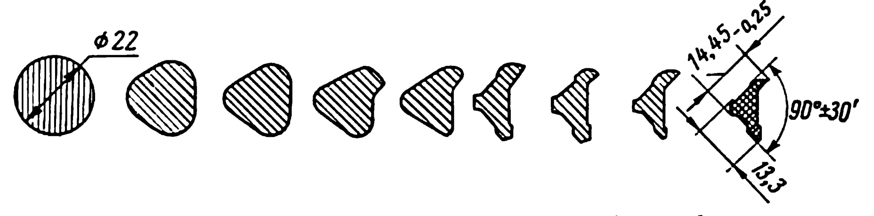


Fig. 102. Etirage d'un profilé à partir d'un rond

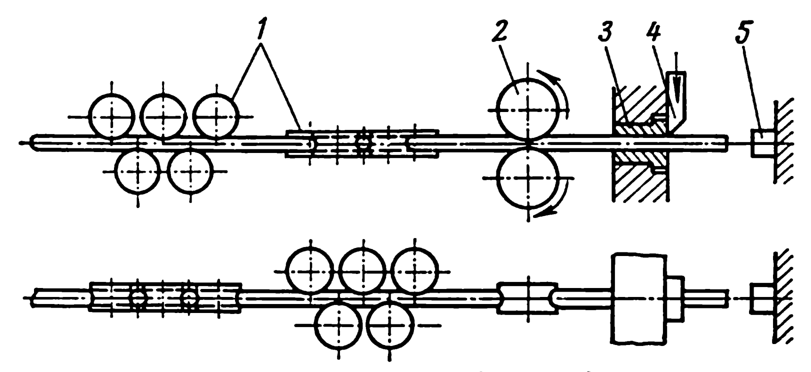


Fig. 103. Schéma d'une machine à dresser et à tronçonner:
1 — galets de dressage; *2* — galets entraîneurs; *3* — bague de tronçonnage; *4* — lame de tronçonnage; *5* — butée

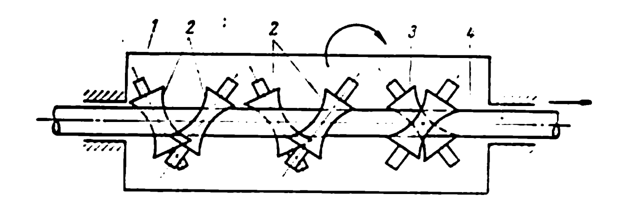


Fig. 104. Représentation schématique d'une machine à dresser et à calibrer:
1 — cadre rotatif; *2* — galets de dressage; *3* — galets de calibrage; *4* — rond à dresser

l'étirage à froid augmente la dureté superficielle et la résistance à l'usure.

L'étirage est le mode de fabrication le plus avantageux pour les pièces dont le profil est le même sur toute la longueur. L'étirage à froid permet d'obtenir des formes de section les plus variées : roues à rochet, petits pignons, cornières, auges, etc. Dans ces conditions on obtient aisément la 4e classe de précision et la 6e classe d'état de surface.

Avant de s'attaquer au façonnage des ébauches obtenues à partir des laminés, les barres doivent être dressées et débitées. Il arrive que les ébauches débitées sont encore dressées en cours d'usinage.

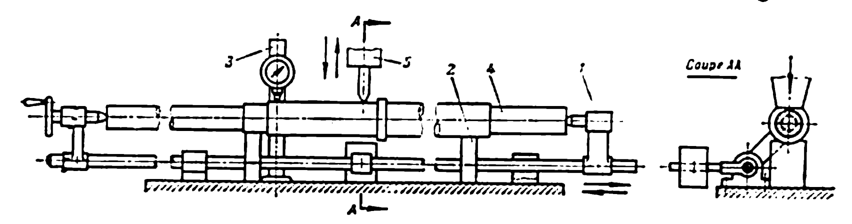


Fig. 105. Schéma de dressage des ébauches sur une presse :
1 — pointes amovibles ; 2 — vés d'appui ; 3 — comparateur ; 4 — ébauche ; 5 — coulisseau

Le *dressage des fils* s'effectue sur des machines à dresser et à tronçonner. Le dressage est réalisé par des galets, alors que le tronçonnage se fait par le couteau qui agit sur le produit poussé jusqu'à la butée (fig. 103). Après le dressage la courbure ne dépasse pas 0,5 à 0,7 mm par 1 m courant de fil.

Le *dressage des barres* est réalisé sur des machines à dresser et à calibrer. Chacune de ces opérations se fait par des galets respectifs (fig. 104). La courbure qui demeure après le dressage d'une barre brute est de 0,9 à 0,5 mm par 1 m courant.

Les machines à dresser et à calibrer s'emploient également pour le dressage et le calibrage des ébauches sous forme de barres longues après leur usinage sur des tours en l'air. Dans ce cas, la courbure résiduelle est comprise entre 0,2 et 0,1 mm par 1 m de l'arbre et peut être réduite jusqu'à 0,05 mm/m.

La productivité des machines à dresser et à calibrer est très élevée : 1,4 à 1,6 m/mn pour le dressage et 0,6 à 0,8 m/mn pour le calibrage des barres. La précision du calibrage en fonction du diamètre est de 30 à 50 μ.

Le dressage à froid des laminés tronçonnés ainsi que des pièces forgées se fait sur des presses, alors que celui des pièces cylindriques de faible longueur, sur des machines à rouler aux coussinets lisses.

Le *dressage à froid sur des presses* (fig. 105) s'emploie pour des ébauches centrées. L'endroit et la valeur de la courbure sont détermi-

nés au comparateur en faisant pivoter l'ébauche serrée entre pointes ; après la vérification, ces dernières sont desserrées et l'ébauche dégagée vient prendre place sur des vés d'appui rigides. Sur les presses mécaniques, le réglage de l'effort nécessaire et de la course du coulisseau s'obtient par action sur la pédale. La courbure qui reste après le dressage varie suivant le diamètre de 0,05 à 0,15 μ par 1 mm de la longueur totale de l'ébauche.

Une variante de ce procédé est le dressage à la main d'une ébauche montée entre pointes à l'aide d'un serre-joint. Pour la même précision de dressage, la productivité dans ce cas est de beaucoup inférieure à celle du travail à la presse.

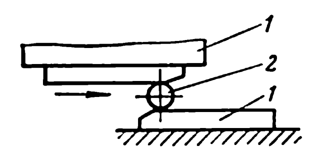


Fig. 106. Représentation schématique du dressage des ébauches cylindriques sur des machines à rouler: 1 — coussinets lisses plats; 2 — ébauche

Le *dressage à froid sur des machines à rouler à coussinets lisses* (fig. 106) s'emploie pour des ébauches cylindriques sans centres d'une faible longueur. Le dressage est réalisé par laminage de l'ébauche entre des coussinets lisses. Une productivité élevée va de pair alors avec une précision allant de 0,05 à 0,15 μ par 1 mm de la longueur totale de l'ébauche.

Le dressage à froid entraîne la redistribution des tensions internes qui déforme la pièce. C'est pourquoi ce procédé ne convient pas pour la fabrication des pièces importantes.

Le *tronçonnage des laminés en ébauches* prévues pour l'usinage ultérieur se fait sur des cisailles ou des presses par sciage, à l'outil à tronçonner sur des tours, par coupage anodique, aux disques de friction, par oxycoupage et coupage à l'arc électrique.

Le *tronçonnage sur des cisailles et des presses* est un mode très productif de débitage des laminés en ébauches. Mais cette opération laisse une empreinte dont la grandeur dans le sens perpendiculaire à la coupe est définie expérimentalement; elle n'est pas supérieure à 0,2 d'épaisseur d'un plat, du côté d'un carré ou du diamètre d'une barre. Lors de l'usinage ultérieur de l'ébauche tronçonnée, il faut tenir compte de ce défaut.

Les modèles des cisailles combinées fabriquées par les usines soviétiques sont prévus pour le coupage des tôles d'acier, plats, ronds, carrés, cornières, profilés en U et poutrelles en H.

Le tronçonnage par sciage est réalisé sur des scies mécaniques, à ruban ou circulaires, à la meule.

Le *tronçonnage sur des scies mécaniques* est le procédé le moins productif mais son universalité contribue à rendre son usage très large, car il peut s'employer pour une plage très large de dimensions quels que soient les profils et les longueurs. Un autre avantage de ce procédé est la faible perte de métal par l'exécution du trait de scie dont l'épaisseur varie de 1,2 à 2,5 mm.

Pour élever la productivité du tronçonnage dans le cas des barres, on les serre en paquet bloqué dans un étau à vés (fig. 107).

Le *tronçonnage sur des scies à ruban* se fait surtout pour chuter les jets, les évents et les masselottes des pièces de fonderie.

Le *tronçonnage sur des scies circulaires* est un mode de coupage très productif et très usité. Les diamètres des scies circulaires varient de 275 à 2 000 mm et leur épaisseur de 5 à 14,5 mm.

Le tronçonnage sur des fraiseuses horizontales par fraises à trancher se rapporte également à cette méthode. Le diamètre des fraises prévues à cet effet s'étend de 60 à 200 mm, leur épaisseur est de 1,5 mm et le nombre de dents varie de 30 à 60 ou de 18 à 30, suivant la construction de la fraise. Le coupage courant s'effectue avec des avances qui s'échelonnent de 0,01 à 0,03 mm/dent.

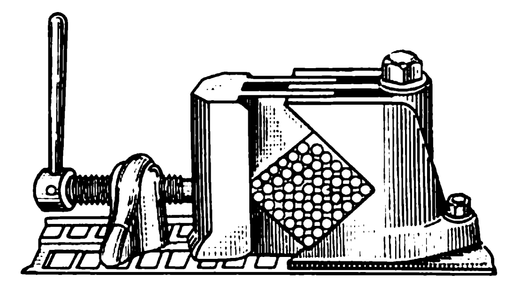


Fig. 107. Etaux à vés pour le tronçonnage des barres par paquets sur des scies mécaniques

Le *tronçonnage à la meule* est prévu pour le coupage des ébauches trempées en acier ainsi que des barres en acier à outils et autres matériaux durs. L'agglomérant des meules est une bakélite ou une vulcanite ; la vitesse circonférentielle d'une meule en bakélite peut atteindre 50 m/s, et celle d'une meule en vulcanite, 30 m/s.

La largeur du trait de scie est de 1,5 à 2 fois supérieure à l'épaisseur de l'outil, que ce soit une scie ordinaire, à ruban, circulaire, une fraise scie ou une meule.

Les *outils à tronçonner* s'emploient sur des tours, surtout pour obtenir des ébauches à partir des barres ou des tubes, ainsi que pour la mise à longueur des barres et des tubes. Le diamètre maximal d'une barre prévue pour le tronçonnage est défini par la capacité de la machine. Il existe de grosses machines pour le tronçonnage des lingots, tel le modèle 1865 qui permet de débiter des pièces de 600 mm de diamètre et jusqu'à 3200 mm de longueur. En construction mécanique lourde on emploie des outils à tronçonner susceptibles de travailler avec un porte-à-faux allant jusqu'à 650 mm pour couper des pièces encore plus grosses. Ces outils portent des plaquettes rapportées en carbure dur T5K10 ; leur largeur varie de 18 à 22 mm. L'avance de coupe est de 0,2 à 0,4 mm/tr et la vitesse de coupe de 35 à 200 tr/mn en fonction de la matière d'œuvre et de l'emploi d'un liquide d'arrosage.

Généralement, la pièce n'est pas tronçonnée définitivement, on laisse un col de 0,07 à 0,2 du diamètre de l'ébauche, qui est rompu en

fin d'opération. Toutefois, il est très rare que l'outil se brise même si on ne laisse pas de col ou si la pièce comporte un trou central.

Le choix du mode de tranchage ne détermine pas la précision de la longueur de l'ébauche; cette précision est définie par la cote transversale, car le défaut de perpendicularité du plan de la coupe (du bout) par rapport à l'axe de l'ébauche augmente proportionnellement à la dimension transversale de l'ébauche dans le cas du tronçonnage à l'outil; pour les barres ce défaut est proportionnel au rayon, et pour les tubes, à la différence entre les rayons des surfaces extérieure et intérieure.

Le *tronçonnage anodique* est réalisé par un disque ou un ruban sans denture. La barre à trancher ou l'anode est connectée au pôle positif, alors que l'outil ou la cathode au pôle négatif d'une génératrice de basse tension. L'outil glisse avec une faible pression sur le plan de la coupe, alors qu'un jet de fluide de coupe est refoulé par une tuyère dans le jeu entre la barre et l'outil; il se forme ainsi à la surface de l'anode un film, mauvais conducteur d'électricité; la destruction du métal est réalisée par la dissolution électrochimique du film évacué ensuite par le disque ou le ruban. La dureté et la résistance du métal ne jouent aucun rôle; ce procédé permet de couper tous les métaux y compris les alliages durs.

Les caractéristiques électriques du tronçonnage anodique sont définies par les données suivantes: tension nominale, 20 à 30 V; courant nominal, 20 à 500 A; densité de courant, 70 à 500 A/cm^2. L'appareillage employé pour ce procédé est alimenté en courant continu, car le courant alternatif ralentit la coupe et accélère l'usure des outils.

Les disques employés dans ce procédé sont en tôle d'acier. Les machines fabriquées par les usines soviétiques sont prévues pour l'utilisation des disques dont les diamètres varient de 200 à 1050 mm et l'épaisseur, de 0,5 à 2 mm. L'usure des disques constitue 20 à 30 % du poids du métal enlevé et dépend du régime et des conditions de l'exécution de l'opération. Le trait de scie est défini par l'épaisseur du disque, la rigidité de ce dernier et son déplacement axial périodique. Généralement, il est de 1,5 à 2 fois plus grand que l'épaisseur de l'outil.

Comme fluide de coupe on utilise la solution aqueuse de verre soluble, de phosphure, de siliciure ou de sulfure de sodium, la suspension d'argile dans l'eau et autres liquides susceptibles de former sur l'anode un film, mauvais conducteur d'électricité. Le débit du fluide est de 5 à 35 l/mn suivant le diamètre de la barre.

La vitesse circonférentielle du disque est de 15 à 20 m/s ; l'avance, de 7 à 30 mm/mn ; la pression spécifique du disque, de 0,5 à 2 kg/cm^2 suivant le diamètre de la barre.

Les pressions négligeables nécessaires pour la marche de l'opération permettent d'assurer une précision très poussée (300 à 600 μ pour un diamètre des barres de 18 à 120 mm). L'état de surface au droit du tranchage varie de la 2e à la 4e classe. La dureté superficielle de l'acier n'augmente quelque peu que dans le cas de régimes rigoureux par suite des effets thermiques. Le volume du métal enlevé est de 2000 à 6000 mm³/mn pour les machines à disque, et plus de 6000 mm³/mn, pour les machines à ruban.

Si l'opération est menée avec des densités de courant élevées, il se forme une couche superficielle « durcie » d'une profondeur de 10 à 30 μ. Une faible densité de courant ne modifie pas la structure.

Le *tronçonnage par des disques à friction* est un mode très productif de tronçonnage des profilés et des nuances quelconques, y compris des aciers de construction très résistants et difficiles à usiner.

Le phénomène de coupe est réalisé par la chaleur de frottement dégagée au droit du contact du métal avec l'arête du disque. La température du métal tronçonné atteint alors 800 à 1100°, ce qui le rend aisément évacuable à partir du trait de scie sous forme d'un faisceau d'étincelles; dans ces conditions, l'usure du disque est négligeable. Il arrive que dans la zone du trait de scie les particules du métal fondent. L'arête des disques peut être lisse ou taillée (le pas des dents varie de 3 à 4 mm, leur hauteur, de 1,5 à 2,0 mm). La vitesse circonférentielle du disque est de 60 à 110 m/s; son diamètre est choisi suivant les dimensions des pièces à tronçonner. Ainsi, pour tronçonner des laminés jusqu'à 20 mm de diamètre, on choisit un disque de 500 × 3,5 mm; pour 100 mm de diamètre, un disque de 700 × × 5 mm; pour le tronçonnage des tubes à parois minces d'un diamètre de 130 mm, il faut prendre un disque de 400×2,5 mm. L'épaisseur du disque B est définie par la relation $B = 0{,}007\ D$ mm, où D est le diamètre du disque en mm.

Pour parer aux vibrations, le disque est serré par des rondelles d'un diamètre $D \geqslant 0{,}5D$.

En tranchant des barres d'un diamètre supérieur à 10 mm, il est recommandé de refroidir le disque. La productivité du travail au disque à friction est à peu près 2,5 fois supérieure à celle du tronçonnage par scie mécanique usuelle.

L'*oxycoupage* s'emploie surtout pour trancher les tôles, les carrés et les plats d'acier, mais il peut également être utilisé pour le tronçonnage des profilés. Si l'opération est menée d'une manière rigoureuse, les bords de la coupe ne brûlent ni ne fondent pas. Le tronçonnage de l'acier provoque la normalisation d'une couche superficielle de 2 à 5 mm et la trempe de l'acier s'il est trempable. Lorsque la dureté ainsi produite est trop grande, elle est éliminée soit par recuit local, soit par recuit total.

La surface de la coupe est nette lorsque la teneur en carbone est inférieure à 0,3 % ; avec un taux de carbone accru, la netteté de la surface de la coupe dégrade et l'opération s'effectue plus lentement; si la teneur en carbone dépasse 0,8 %, l'oxycoupage est à prohiber.

Avec l'augmentation du taux de certains éléments d'alliage l'oxycoupage de l'acier devient difficile (3 % Cr; 0,25 % Mo; 10 % W; 2 % Al) ou impossible (5 % Cr; 20 % W; 10 % Al). Une teneur en nickel supérieure à 20 % ralentit quelque peu le tronçonnage. La présence dans les aciers de construction du manganèse, silicium, cuivre, vanadium, titane, phosphore et soufre en quantités usuelles ne rend pas la coupe plus malaisée.

La précision et la netteté de la coupe permettent d'appliquer l'oxycoupage au gabarit (sur machines à reproduire) au travail des tôles épaisses, des plats ou des carrés en acier et d'obtenir des ébauches d'une forme complexe ne réclamant presque aucun usinage ultérieur (roues dentées, engrenages, etc.). La précision courante est de $\pm 0,5$ mm, et de $\pm 0,2$ mm pour les machines de précision.

Le *coupage à l'arc électrique* s'emploie pour le travail des métaux ferreux et non ferreux, ainsi que des alliages des métaux non ferreux.

Dans ce procédé, le métal est tronçonné par fusion au droit de la zone de coupe. Les bords de la coupe en fondant compromettent la précision et la netteté de la surface de coupe qui sont ainsi inférieures à celles obtenues par oxycoupage, mais si la dextérité de l'opérateur est suffisante, il est fréquent que les résultats soient acceptables.

Pièces brutes de forge

Les pièces de forge peuvent être obtenues soit par forgeage libre, soit par formage dans des matrices volantes ou des matrices fixes. Les ébauches de départ pour les pièces forgées sont les lingots ou les laminés. Les lingots sont utilisés pour le formage de grosses pièces par forgeage libre.

Les lingots présentent une pyramide tronquée à section carrée ou polygonale ou encore (si la section est ronde) un cône tronqué. Le rapport de la longueur à la dimension transversale moyenne est choisi entre 2 et 3.

A la sortie de la fonderie, les lingots comportent des masselottes à leur extrémité large. Au cours du forgeage, la masselotte, où se trouve la soufflure de retrait, ainsi que la partie inférieure du lingot sont éliminées; la masselotte enlevée constitue 20 à 35 % et la partie inférieure, 5 à 10 % du poids du lingot.

Les aciers marchands servent de matière d'œuvre pour la fabrication de moyennes et petites pièces soit par forgeage libre, soit par matriçage. Le forgeage libre permet d'exécuter des pièces depuis

les plus petites jusqu'aux plus grosses de l'ordre de 200 t et plus. Le matriçage à chaud est prévu généralement pour des pièces pesant moins d'un kilogramme jusqu'à 200 kg. Il arrive même qu'on fasse appel à ce mode de travail pour fabriquer des pièces plus lourdes. Le matriçage est une opération beaucoup plus précise que le forgeage libre, il est, par ailleurs, beaucoup plus productif.

Passons en revue les différents modes d'exécution des pièces de forge.

Le *forgeage libre* s'effectue au marteau de forge (à vapeur, à air comprimé, à ressort) et aux presses à forger hydrauliques.

Les petites pièces de forme, dont le poids ne dépasse pas 40 kg, exécutées à partir des aciers marchands, sont formées sur des pilons à air comprimé, à ressort et parfois sur des marteaux-pilons à vapeur dont le poids de la masse frappante atteint 1 t.

Les pièces de forme moyennes, pesant jusqu'à 300 kg, obtenues à partir de brames ou de billettes, sont forgées sur des marteaux-pilons à vapeur dont le poids de la masse frappante va de 1 à 3 t; les pièces plus grosses (de forme, jusqu'à 700 kg, et les arbres lisses, jusqu'à 1500 kg) sont exécutées sur des marteaux-pilons à vapeur, dont le poids de la masse frappante est de 5 t, ou sur des presses à forger hydrauliques développant une puissance allant jusqu'à 800 t.

L'emploi des presses à forger augmente la productivité de 30 à 50 % par rapport à celle des pilons à vapeur. Les pièces lourdes, forgées à partir de lingots (d'un poids moyen de 2 à 160 t et maximal de 240 t), sont formées sur des presses à forger hydrauliques d'une puissance supérieure à 800 t et allant jusqu'à 10 000 t. Les pièces plus lourdes doivent être formées sur des presses encore plus puissantes.

Ainsi, en construction mécanique lourde les pièces de forge ne sont exécutées que par forgeage libre. Mais pour les pièces moyennes et petites, ce mode de fabrication n'est avantageux que dans le cas d'une production unitaire.

Les tolérances δ imposées aux cotes des pièces exécutées par forgeage libre varient de 12 à 72 mm suivant la forme et les dimensions. Ainsi, pour les pièces rondes de $\varnothing\, 200 \times 1000$ mm, la tolérance δ est de 12 mm, alors que pour une pièce de $\varnothing\, 1000 \times 20\,000$ mm, la tolérance $\delta = 40$ mm; la tolérance δ est de 26 mm pour les bagues laminées d'un diamètre extérieur de 630 mm et d'une hauteur de 250 mm, et de 72 mm pour $\varnothing\, 4000 \times 1000$ mm; pour les moutons à cote transversale de 315 mm et d'une longueur de 630 mm, $\delta =$ $= 20$ mm, et pour des cotes de 1600×1500 mm, $\delta = 48$ mm, etc.

Le *formage en matrices volantes*, effectué sur des marteaux à forger ou sur des presses à forger hydrauliques, s'emploie pour la fabrication de petites séries.

Pour obtenir des pièces d'une forme simple on peut parfois les matricer directement à partir d'un rond ou d'un carré laminés. Mais il est d'usage de transformer le lopin en ébauche d'une forme voisine de celle de la pièce. Dans le cas du travail aux matrices volantes ces opérations d'ébauchage sont réalisées généralement par forgeage libre. La forme définitive de la pièce étant déterminée par celle des matrices, la précision géométrique et dimensionnelle est plus élevée que dans le forgeage libre.

La réalisation de la forme imposée demandant moins de temps qu'en forgeage libre, la productivité du travail en matrices volantes est de beaucoup supérieure.

L'*estampage sur des marteaux estampeurs* est appliqué pour la fabrication en grandes séries ou de masse et fait appel à des matrices fixes.

La préparation d'un lopin (laminé) qu'il faut transformer en pièce de forme imposée est assurée par des gravures d'ébauchage taillées dans la même matrice que la gravure finale (matrices à gravures multiples). S'il est impossible de tailler toutes les gravures dans une seule matrice, l'opération est alors divisée pour être exécutée sur deux ou plusieurs marteaux. Dans les conditions d'une production de masse, la division de l'opération présente parfois des avantages pour répartir judicieusement la charge de l'équipement et accroître la productivité. L'estampage est alors assuré par deux marteaux ou plus, par laminoir de forge et marteau, par machine à forger horizontale et marteau, ou encore par une autre combinaison des engins de forge.

Pour fabriquer de petites pièces on recourt à des matrices susceptibles d'estamper simultanément plusieurs pièces et d'élever ainsi la productivité. Pourtant, pour simplifier le réglage du marteau, il n'est pas recommandé de tailler une gravure pour plus de trois figures.

La productivité du travail est nettement accrue lorsqu'on utilise des lopins obtenus à partir des profilés à bulbe produits par laminage ou cylindrage périodiques. Dans ces conditions, les gravures d'ébauchage sont rendues inutiles ou leur nombre diminue nettement en permettant ainsi d'augmenter la productivité du marteau. Dans certains cas il est avantageux d'utiliser des profilés spéciaux.

Le chauffage par induction est très favorable pour l'estampage. Il réduit de 8 à 10 fois l'épaisseur de la couche décarburée ; celle de la couche des pailles diminue de 2 à 3 fois par rapport à l'échauffement dans un four à flamme. Le chauffage par induction améliore en même temps les conditions de service, permet de réaliser l'échauffement beaucoup plus vite et d'automatiser l'avance et la livraison des ébauches en fonction du temps.

Les pièces forgées au marteau subissent le dressage à chaud ou à froid. Le dressage à chaud se fait dans les gravures finales des

matrices. Les pièces grosses et moyennes sont dressées dans des matrices appropriées. Le dressage à chaud peut s'effectuer également sur des presses d'ébavurage ; l'utilisation de ce procédé, dont les résultats sont meilleurs par rapport au dressage dans les gravures finales des matrices et dans les estampes de dressage des marteaux, est limitée pourtant par la puissance de la presse.

Le dressage à froid dans des matrices est plus productif, mais il est inapplicable pour certains matériaux par suite de leur fragilité. La plupart des aciers de construction sont susceptibles d'être dressés à froid tant que les déformations sont faibles. Pour prévenir le criquage, il faut dresser les pièces après recuit ou normalisation. Le dressage à froid sur des presses d'ébavurage est encore plus productif, mais il n'est applicable qu'à de petites pièces par suite d'une puissance limitée de ces engins.

Les pièces dont l'élasticité rend nécessaire un cambrage dans le sens opposé à la courbure sont dressées sur des presses appropriées.

La durée de service des matrices d'estampage, définie par le nombre de pièces exécutées jusqu'au premier remplacement des outils, est fonction de la forme géométrique et des dimensions de certains éléments de la gravure finale. Le tableau suivant indique la durée approximative des matrices en fonction de la puissance du marteau.

Puissance en t	Durée (nombre de pièces estampées)
0,5 à 1,0	10 000 à 18 000
1,0 à 1,5	7 500 à 15 000
1,5 à 3,0	5 500 à 12 000
3,0 à 4,0	4 000 à 9 000
4,0 à 6,0	2 500 à 6 000
plus de 6,0	1 500 à 4 500

L'*estampage sur des machines à forger horizontales* s'emploie pour l'obtention des ébauches par refoulement à partir des barres à l'aide des matrices ouvertes. Ce procédé est caractérisé par une productivité élevée ; d'autre part, il permet de réaliser une économie de métal importante, les bavures ne dépassant pas 1 % du volume.

La matière d'œuvre est constituée par des laminés de précision (ronds et, plus rarement, carrés). Une précision particulière est nécessaire pour parer soit au grippage de l'ébauche dans la gravure de serrage de la matrice avec formation d'une bavure longitudinale dans le joint des matrices, soit au rejet de l'ébauche à partir de la matrice sous la pression du poinçon par suite d'un serrage insuffisant.

L'*estampage sur des presses hydrauliques* est appliqué surtout pour la fabrication des ébauches creuses cylindriques, ainsi que de grosses pièces de forme variées. Les presses hydrauliques se

distinguent par leur productivité élevée (150 à 300 pièces par heure en fonction du poids et des dimensions). Ce procédé permet de fabriquer des pièces par poinçonnage profond, par brochage extérieur à l'aide des bagues ou des cadres des ébauches poinçonnées pour en faire des pièces creuses tout en augmentant leur longueur, par refoulement des ébauches pleines et creuses; il permet de réaliser l'estampage aux poinçons dans des matrices fermées ou ouvertes.

Les matières de départ courantes de l'estampage sur des presses hydrauliques sont les barres laminées (ronds ou carrés).

L'*estampage sur des presses à friction* se fait pour fabriquer des boulons, des rivets et des produits similaires, obtenus par refoulement, des pièces de forme identiques à celles estampées sur des marteaux, ainsi que des pièces comportant des rebords et autres éléments latéraux qu'il est impossible de réaliser dans des matrices fixes sur un marteau; ces éléments sont exécutés dans des matrices ouvertes par des poinçons.

L'estampage sur des presses à friction est défini par 1) une productivité élevée lors de la fabrication des boulons et des rivets (200 à 1000 pièces/h) et une faible productivité par rapport à l'estampage au marteau lors de la fabrication des pièces de forme (50 à 200 pièces/h); 2) une économie de métal due à l'absence de bavures ou à des bavures infimes faciles à couper; par contre, la vitesse de déformation étant inférieure à celle réalisée par un marteau, une couche de battitures apparaît à la surface des pièces de forme et ne se détache pas.

La matière d'œuvre est constituée dans ce cas par des laminés à froid ou à chaud, et pour des métaux non ferreux, parfois, par des pièces coulées.

L'*estampage sur des presses à vilebrequin* est utilisé pour presque tous les travaux d'estampage à chaud. La chabotte des presses de ce type est particulièrement robuste, le guidage du coulisseau très sûr. L'estampage volumique emploie comme matière d'œuvre des laminés (ronds, carrés ou profilés à bulbe).

La précision d'estampage assurée par les presses à vilebrequin est supérieure à celle obtenue par d'autres procédés. Cela est dû 1) à l'absence de coups portés pendant le travail au marteau et à la presse à friction, qui compromettent la fixation des matrices et le guidage du coulisseau; 2) au meilleur guidage du coulisseau et aux faibles jeux entre ce dernier et les glissières; 3) à une position inférieure fixe de la matrice supérieure, qui réduit le défaut de formage à la limite des déformations élastiques de la presse et des matrices; 4) à la diminution importante des dépouilles d'estampage par suite de l'utilisation possible des extracteurs rigides.

Le travail sur des presses à vilebrequin rend inutiles ou presque les chevauchements, alors que les surépaisseurs et les dépouilles sont

nettement réduites par rapport à d'autres procédés d'estampage; il en résulte une économie de metal de 10 % et plus.

La quantité de travail diminue de deux fois environ par rapport au travail sur des marteaux.

Les procédés principaux dans le travail sur des presses à vilebrequin sont l'estampage avec bavure, l'estampage par refoulement sans bavure et le filage.

L'estampage avec bavure s'identifie au formage sur des marteaux. Ce procédé permet d'obtenir des moyeux, bagues au flasque, engrenages, culbuteurs, leviers, bielles, vilebrequins et autres pièces susceptibles d'être estampées au marteau.

L'estampage par refoulement sans bavure fait appel à la matrice fermée d'où l'ébauche est chassée par la pression du poinçon pour sortir à travers le trou pratiqué dans le fond de la matrice ou dans la chambre de pression du poinçon.

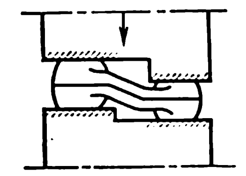


Fig. 108. Exemple de calibrage des surfaces planes

Le filage est analogue au procédé précédent avec cette différence que le métal s'écoule non pas par le trou, mais par le jeu entre le poinçon et la matrice. Ce procédé est utilisé pour la fabrication des douilles, des cartouches, ainsi que des pièces formant caisson ou auge.

Le *calibrage* par frappage qui suit l'estampage est une opération de finition; il peut être réalisé à chaud ou à froid. Le calibrage à froid assure une haute précision et une qualité élevée de surface. Le calibrage à chaud est moins précis et ne s'emploie que pour le travail de grosses pièces.

Le calibrage est effectué sur des presses à genouillère. Le calibrage à chaud peut se faire sur des presses à vilebrequin ou, avec moins de précision, sur des presses à friction et des marteaux.

On distingue le calibrage des surfaces planes, celui des surfaces des corps de révolution et le calibrage volumique.

Le but du calibrage des surfaces planes est d'assurer une dimension précise des plans opposés de la pièce et d'améliorer leur surface. Ce procédé augmente les dimensions dans le plan perpendiculaire à la direction du corroyage, car rien ne limite l'écoulement du métal dans ce sens. Il faut donc en tenir compte et au besoin diminuer proportionnellement les cotes des pièces frappées. Le calibrage par frappage prévu pour éliminer les dépouilles constitue un cas particulier du calibrage des surfaces planes. Le frappage des surfaces planes peut être appliqué simultanément à des épaisseurs variées et dans des plans situés à des niveaux différents (fig. 108).

L'effort nécessité par le calibrage est fonction de la qualité du métal, de la forme et de l'épaisseur de la pièce. Sa valeur appro-

chée pour l'acier au carbone est de 13 à 16 t/cm², pour l'acier allié, de 16 à 20 t/cm² de l'aire de projection horizontale de la surface soumise au calibrage.

Les tolérances sur les épaisseurs à calibrer varient de 0,16 à 0,63 mm. Le calibrage des mêmes surfaces en deux ou trois reprises, avec traitement thermique intermédiaire pour éliminer les contraintes résiduelles, permet d'assurer une tolérance de 0,1 à 0,3 mm.

La distribution des contraintes produites par le frappage a une allure pyramidale ; les couches de métal situées au centre de la surface frappée sont plus sollicitées que les couches de métal périphériques. Il en résulte que les déformations élastiques augmentent à mesure que l'on s'approche du centre, et l'épaisseur au centre est plus grande qu'au voisinage des bords. Pour de grandes surfaces, cette différence atteint 0,4 mm. On peut y pallier en rendant quelque peu concave la surface à calibrer ou convexe l'aire de corroyage de la matrice de frappe, ou encore en procédant à un frappage multiple.

Le calibrage par frappage des surfaces curvilignes des corps de révolution est réalisé par des matrices de frappe en plusieurs coups avec, après chaque coup, pivotement de la pièce à un certain angle autour de l'axe de révolution. Dans ce cas, l'écoulement latéral du métal est limité, mais la pièce s'allonge quelque peu dans le sens de l'axe longitudinal et il faut en tenir compte lors de l'estampage. Les tolérances sur les cotes diamétrales des surfaces des corps de révolution varient généralement de 0,2 à 0,7 mm.

Le calibrage volumique a lieu dans des matrices dont les dimensions des gravures correspondent exactement à celles de la pièce à obtenir. Dans cette opération, le métal en excédent ne s'écoule que pour former une bavure, ce qui produit dans le métal des contraintes importantes et augmente la puissance nécessaire de la presse, accroît le recul et aboutit en définitive à réduire la précision. Il est donc avantageux de diminuer quelque peu les cotes des pièces dans le plan du joint. Les tolérances que ce procédé permet d'assurer sont 1,5 fois supérieures à celles obtenues avec le calibrage des surfaces planes.

La puissance qui doit être disponible sur une presse de calibrage est définie par la formule

$$P = KF \text{ t},$$

où K est la pression spécifique en t/cm²;

F, l'aire de projection de la surface sollicitée par le calibrage, en cm².

Pour un acier au carbone on pose $K = 20 \div 30$ t/cm²; pour un acier allié, $K = 40$ t/cm².

Si la pièce comporte des éléments dont la précision doit être plus poussée que celle assurée par le calibrage volumique, elle est soumise au calibrage des plans.

En plus des méthodes qui viennent d'être passées en revue, le forgeage peut s'effectuer sur : 1) des machines à forger verticales ou maxipresses, 2) des machines à rétreindre, 3) des machines à cintrer horizontales, 4) des laminoirs à forger.

Les *presses à forger verticales* servent pour fabriquer de petites pièces, arbres et axes à section variable, emporte-pièces, burins, crampons de rail, etc., par emboutissage par poinçons de forme en plusieurs opérations.

Les *machines à rétreindre* sont utilisées pour la fabrication des pièces métalliques à partir des barres et des tubes par corroyage et étirage ; on peut obtenir ainsi des formes cylindriques, coniques, ellipsoïdales, demi-rondes et bien d'autres.

Les *machines à cintrer horizontales* fournissent divers étriers, cornières, montants, supports, suspensions, etc., exécutés à partir des laminés ronds, carrés ou plats.

Les *laminoirs à forger* produisent une bande d'ébauches liées entre elles par une bavure métallique chutée par découpage sur une presse d'ébavurage ; un profilé à bulbe estampé ensuite sur un marteau ou une presse ; ils permettent également de réaliser l'étirage en conférant à la pièce la forme imposée dans le sens transversal et longitudinal ; l'étirage au laminoir à forger est parfois combiné, pour ébaucher ou finir, au travail sur marteaux ou sur presses.

Le *nettoyage des pièces de forge* est nécessaire pour prévenir l'incrustation des battitures et l'estampage des défauts superficiels qui peuvent se produire lors du calibrage ultérieur, pour rendre les conditions d'usinage des surfaces plus favorables et enlever la crasse, la rouille et les battitures des surfaces non usinées.

Le nettoyage des battitures à l'aide d'un tonneau est un procédé trop vieux ; sa faible productivité ne répond plus au rythme actuel de la production. Le sablage est également un procédé peu efficace ; la quantité de poussière produite par l'application de cette méthode est si grande que même une ventilation puissante ne suffit pas pour l'évacuer. C'est pourquoi il est recommandé d'effectuer le nettoyage des pièces de forge à l'aide des appareils de grenaillage avec amenée mécanique de grenaille par rotor tournant à grande vitesse ; la poussière dégagée par le fonctionnement d'un tel appareil peut être facilement évacuée par un système de ventilation. Dans certains cas, pour nettoyer notamment les outils de coupe, on recourt au sablage hydraulique à la pulpe (mélange de sable et d'eau).

Les battitures sont également éliminées par décapage des pièces dans des solutions d'acides.

La rouille et autres encrassements sont éliminés par brûlage ou avec des brosses métalliques.

Les petits défauts superficiels sont corrigés par burinage pneumatique, meulage, brûlage (au chalumeau oxyacétylénique, en faisant fondre l'aire défectueuse de la pièce).

Pièces mécaniques fabriquées par forgeage à froid et par travail des métaux en feuilles

Le *forgeage à froid* s'emploie pour la fabrication de la boulonnerie (boulons, écrous, rivets, etc.), écrous à chapeau, goujons de fixation, poussoirs de soupapes, rouleaux et billes, obturateurs, petits arbres à fusées, etc. Parfois pour exécuter ce travail on recourt à la chauffe.

Le forgeage à froid (et avec chauffe) se fait sur des machines automatiques usuelles à productivité élevée. Les diamètres des pièces qu'elles permettent de fabriquer ne dépassent pas 25 mm, et leur longueur, 200 mm. Si elles sont plus longues, il faut utiliser des machines automatiques spéciales.

La productivité des machines à forger automatiques est de 30 à 400 pièces par minute, suivant les dimensions et la forme.

Les écarts des cotes imposées correspondent à la 3e ou 3a classe de précision et à la 6e ou 7e classe d'état de surface.

Dans certains cas le forgeage à froid s'accompagne de la réduction du diamètre du barreau prévu pour le roulage d'un filet ou du calibrage de la partie lisse du barreau passé par une matrice spéciale.

La matière d'œuvre est une barre calibrée d'un diamètre variant de dixièmes de millimètre jusqu'à 25 mm. Parfois on emploie une barre d'un diamètre plus grand. Le forgeage à froid s'emploie pour des aciers au carbone (des aciers de construction des nuances 08 à 45 et laminés d'usage courant), des aciers alliés, des métaux non ferreux et leurs alliages.

Les chutes dans ce procédé sont infimes. L'économie de métal s'élève parfois à 40 % par rapport à l'usinage des pièces de même type à partir d'un laminé.

Le *travail des métaux en feuilles par déformation* fournit des pièces mécaniques telles que protecteurs, couvercles, carters, chapeaux, ailes, disques, bagues de friction et d'étanchéité, bagues d'amiante armé de fils métalliques et joints de formes les plus variées, etc. Ce mode d'exécution est largement appliqué dans la fabrication des constructions soudées et estampées, très complexes parfois, comme par exemple les bâtis estampés et soudés, la carrosserie automobile, etc.

La matière d'œuvre en emboutissage est constituée de tôles de faible épaisseur et des bandes, ainsi que de carton, de cuir et d'autres matériaux non métalliques.

Pour rétablir les propriétés plastiques du métal déformé on recourt au recuit ou à un autre traitement thermique, suivant la nuance du métal. Après le traitement thermique, on procède au décapage et au lavage.

Le travail des métaux en feuilles par déformation est un procédé technologique à productivité très élevée. Les défauts des pièces estampées sont conditionnés surtout par les défauts de fabrication des matrices et leur usure. Pour les cotes libres, on peut assurer aisément la 7ᵉ classe de précision. Lorsque les cotes sont tolérancées, il est possible de réaliser la 3ᵉ ou 3a classe de précision.

Les matrices et les poinçons d'estampage sont ajustés, chacun pris séparément, suivant des tolérances comprises entre 10 et 80 μ, en fonction de l'épaisseur de la tôle. La tenue des outils entre les remises en état varie de 7000 à 130 000 coups suivant le genre et la nuance du matériau, son épaisseur et le caractère de l'opération (découpage, pliage, assemblage en estampage, etc.).

La précision poussée du travail des métaux en feuilles permet de fournir des pièces finies qui ne réclament aucun usinage ultérieur si ce n'est qu'un achèvement peu important.

Pièces coulées

La précision des pièces venues brutes de fonderie est définie par le procédé mis en œuvre. Pour le moulage en sable des pièces en fonte grise et en acier les normes prévoient trois classes de précision (Iʳᵉ, IIᵉ et IIIᵉ).

Pour des cotes jusqu'à 500 mm, la IIIᵉ classe de précision est inférieure à la 9ᵉ classe de précision usuelle, alors que pour les cotes supérieures à 500 mm, elle correspond à la 10ᵉ ou 11ᵉ classe de précision établies par les normes. La IIᵉ classe correspond à peu près à la 9ᵉ classe de précision pour des pièces inférieures à 500 mm, et à la 9ᵉ ou 10ᵉ classe pour des pièces plus grosses. Enfin, la Iʳᵉ classe correspond à la 7ᵉ ou 9ᵉ classe de précision homologuées par les normes.

Les tolérances assurées par le moulage en moules permanents et par centrifugation correspondent à la 7ᵉ ou 8ᵉ classe de précision et à la 1ʳᵉ classe d'état de surface.

La précision du moulage en carapace s'échelonne de la 4ᵉ à la 7ᵉ classe, et l'état de surface, de la 3ᵉ à la 4ᵉ classe.

Le moulage à la cire perdue fournit des pièces d'une précision allant de la 4ᵉ à la 5ᵉ classe et de la 4ᵉ à la 6ᵉ classe d'état de surface.

Le moulage sous pression assure la 3ᵉ ou la 4ᵉ classe de précision et la 4ᵉ ou la 7ᵉ classe d'état de surface.

En plus de ces renseignements, indiquons les domaines d'application des modes de moulage variés.

Le *moulage à découvert* avec modèle s'emploie pour la fabrication unitaire ou en petite série de pièces simples ayant une surface plane qui se situe en haut pendant la coulée (grilles à barreaux, cales, etc.).

Le *moulage en fosse* avec modèle, au trousseau à l'axe de rotation vertical, au trousseau horizontal, ainsi que le moulage sur carcasse s'utilisent dans la fabrication unitaire et en petite série de grosses pièces pour rendre moins chère la fabrication des modèles et réduire le temps de leur fabrication.

Le *moulage à la main en châssis* avec modèle sert pour fabriquer de petites et grosses pièces de formes variées. Les modes de moulage définis par la forme de la pièce sont les suivants: moulage en deux châssis, moulage nécessitant un joint décroché, moulage avec un châssis faux, moulage avec modèle démontable, moulage avec chape, moulage au trousseau à axe de rotation horizontal.

Le moulage en deux châssis se fait avec des modèles au joint plat.

Lorsqu'il est impossible de réaliser entre les châssis un joint plat, le moulage nécessitant un joint décroché prévoit l'utilisation des modèles non démontables. La quantité de travail nécessaire est alors plus importante que dans le procédé précédent.

Le moulage avec un châssis faux est utilisé dans le même cas que celui nécessitant un joint décroché, pour l'exécution d'un lot de pièces important afin d'élever la productivité par exemple.

Lorsque le moulage s'effectue avec un modèle qui n'admet pas la réalisation d'un plan de séparation sur toute la section, on recourt au moulage avec modèle démontable; l'opération se complique alors et la précision dégrade.

Le moulage avec chape est employé lorsqu'il est impossible de dégager le modèle sans prévoir deux plans de séparation.

Le moulage au trousseau à axe de rotation horizontal sert pour fabriquer des pièces de révolution dont la longueur est un multiple important du diamètre (cylindres, tubes, etc.); ce mode permet de rendre moins onéreux le modèle et de réduire les délais de sa fabrication.

Le *moulage mécanique en châssis* peut être effectué a) avec modèles en bois pour la fabrication de petits lots ne dépassant pas 100 pièces; b) avec plaques modèles métalliques pour la fabrication en moyenne et grande série.

Le moulage mécanique peut être appliqué pour la confection des moules en deux châssis et dans le cas où tous les éléments latéraux démontables du modèle sont remplacés par des noyaux.

Le moulage mécanique est un procédé beaucoup plus précis que le moulage à la main, il assure un serrage homogène du sable. C'est pourquoi les pièces moulées à la machine correspondent mieux aux dimensions imposées et leur poids est plus régulier d'une pièce à l'autre.

La productivité du moulage mécanique est supérieure à celle du travail manuel car elle contribue à la mécanisation des opérations

de serrage et de démoulage, libère le mouleur de la pose du modèle sur la plaque, du taillage des attaques et d'autres travaux auxiliaires.

Le *moulage par noyaux* est prévu pour l'obtention des pièces importantes d'une forme compliquée (cylindres des moteurs, culasses des cylindres, palettes des turbines, etc.). Le moule est assemblé de noyaux à l'aide des calibres et des gabarits et permet de réaliser une précision élevée (Ire et IIe classes).

Le *moulage en moules permanents* (*coquilles*) sert pour l'obtention des pièces en métaux ferreux et non ferreux.

Dans la fabrication des pièces en alliages fusibles (zinc, aluminium, magnésium) la tenue des coquilles atteint des centaines de milliers de pièces, dans le moulage de la fonte, 1500 à 5000 pièces et dans celui de l'acier, 600 à 700 petites pièces, 150 à 250 moyennes et 20 à 25 grosses.

Pour parer à la formation à la surface de contact de la pièce et du moule métallique d'une croûte trempée très dure, le refroidissement de la couche superficielle doit être ralenti ; à cet effet, la surface intérieure du moule est garnie d'un poteyage de 10 à 12 mm d'épaisseur recouvert à son tour par de la suie; un autre procédé consiste à échauffer le moule avant son utilisation de 200 à 400° et à couvrir ses surfaces actives d'une couche de peinture réfractaire d'environ 0,1 mm d'épaisseur.

Le moulage en coquilles présente des avantages techniques et économiques importants par rapport au moulage en sable: 1) il améliore la qualité des ébauches (en assurant une meilleure précision et un plus bel état de surface, ainsi qu'une meilleure structure du métal) ; 2) élimine l'opération de moulage, réduit le volume des sables utilisé et le parc des machines assurant leur traitement et leur acheminement ; 3) diminue les surfaces de fabrication nécessaires ; 4) accroît la productivité du travail.

Les pièces moulées en coquilles doivent permettre leur extraction aisée de la coquille et ne doivent pas comporter des variations brusques d'épaisseur.

La coulée en moules permanents est réalisée à l'aide des machines spéciales. L'opération est ainsi rendue plus simple et plus productive par la mécanisation ou l'automatisation de l'ouverture et de la fermeture du moule, de l'extraction des noyaux et des pièces finies. Les machines peuvent compter une ou plusieurs coquilles (jusqu'à 12) portées par un plateau carrousel.

La *coulée continue* doit être considérée comme une variante du moulage en coquilles. Elle consiste à refouler en continu et uniformément le métal en fusion vers un moule métallique refroidi à l'eau qui s'appelle cristallisoir; le lingot solidifié ainsi obtenu est tiré à l'autre extrémité. Ce procédé permet d'obtenir des pièces

sous forme de tube ou de barre d'une section constante d'une longueur quelconque aux propriétés mécaniques très élevées et d'un bel état de surface. Ce procédé peut donc être appliqué pour la fabrication des pièces analogues à celles obtenues à partir des profilés.

Le *moulage par appel au vide* consiste à faire aspirer le métal fondu dans un creuset en le canalisant dans un moule métallique où l'on a créé le vide. Tout en présentant certains avantages, ce procédé possède deux inconvénients importants: faible productivité et domaine d'application limité (exécution des bagues et d'autres pièces simples).

Le *moulage par extrusion* s'opère de la façon suivante: le métal fondu est versé dans la partie inférieure d'un moule métallique; lorsque le poinçon s'abaisse, le métal comprimé remplit l'espace compris entre la partie inférieure du moule et le poinçon. Cette méthode permet de fabriquer de grosses pièces à parois minces (couvercles, plaques à parois minces, etc.).

Le *moulage par centrifugation* utilise les forces centrifuges pour donner au métal liquide la forme du moule. Ce procédé est appliqué le plus souvent pour fabriquer des corps de révolution (bagues, tubes, douilles) et des pièces de forme symétriques (flasques, poulies, roues); l'axe de rotation du moule coïncide alors avec l'axe de symétrie des pièces à exécuter. Ce procédé permet également d'obtenir des pièces asymétriques (segments de frein, leviers, chapes, etc.); dans ce cas, l'axe de rotation de la machine ne passe pas par le corps des pièces, et la force centrifuge ne sert que pour remplir le moule, alors que les surfaces extérieures et intérieures de la pièce sont générées par le moule même.

Les tolérances sur les cotes des pièces moulées correspondent à la 7e ou 8e classe de précision; ainsi l'usinage ultérieur se trouve nettement réduit. Les pièces obtenues par ce procédé ont une structure à grains fins. Les inclusions de scories qui s'accumulent à la surface intérieure de la pièce sont supprimées par l'usinage ultérieur.

L'outillage employé en coulée centrifuge est constitué soit par des moules métalliques soit par des lingotières revêtues. La tenue des lingotières en aciers alliés (au chrome-nickel ou au chrome-molybdène) est de 2000 à 3000 pièces.

Le *moulage sous pression* est un mode de fabrication très productif des pièces précises, dont l'usinage ultérieur est soit inutile soit réduit à des opérations isolées. Il est réalisé à l'aide de machines spéciales et de moules métalliques dont la tenue est fonction des tensions thermiques engendrées dans le moule au cours de la fabrication des pièces; plus la température de fusion de l'alliage est élevée, plus le moulage est difficile à réaliser. On recourt donc à ce mode surtout pour l'obtention des pièces en alliages de zinc, d'aluminium, de magnésium ainsi qu'en laiton.

La productivité des machines semi-automatiques prévues pour la fabrication des pièces inférieures à 300 g est de 300 cycles par heure, les machines automatiques font jusqu'à 500 et plus de cycles par heure. Les machines de ce type les plus rapides peuvent porter la cadence jusqu'à 1000 cycles par heure; si le moule est prévu pour recevoir 6 à 8 pièces, la production horaire peut s'élever à 6000 ou 8000 pièces.

Les pièces moyennes (0,3 à 3 kg) sont fabriquées généralement sur des machines semi-automatiques à une cadence de 80 à 250 cycles par heure. Les machines pour grosses pièces (3 à 15 kg) assurent 40 à 100 cycles par heure.

Le moulage sous pression permet de fabriquer des éléments renforcés des machines en plaçant dans le moule des pièces usinées en d'autres alliages (bronze, fonte, acier).

Les spécifications de fabrication auxquelles doivent satisfaire les pièces coulées sous pression sont analogues à celles imposées aux moulages en coquilles.

La tenue moyenne des moules est fonction de l'alliage mis en œuvre; elle est de 150 000 pièces environ pour les alliages de zinc; 40 000 pour les alliages d'aluminium et de magnésium; 5000 pour les alliages de cuivre.

Le *moulage à cire perdue* s'emploie pour la fabrication des pièces de formes et de dimensions très précises n'imposant pas l'usinage ou en le réduisant aux opérations de finition. La matière d'œuvre peut être constituée de matériaux divers, et même de carbures durs inusinables.

La gamme de fabrication suivant ce procédé rend inutiles les dépouilles du modèle et des joints du moule.

Le *moulage en carapace* est fondé sur la propriété d'un mélange thermo-durcissable de résine et de sable, qui prend la forme d'un moule métallique réchauffé en formant une carapace relativement mince qui se solidifie rapidement.

Ce mode de fabrication permet de réaliser une précision très poussée de la géométrie, les écarts ne dépassant pas la 4e ou 5e classe de précision pour les éléments de l'ébauche obtenus dans un demi-moule et la 7e classe pour ceux obtenus dans les deux demi-moules. L'état de surface correspond à la 4e classe. La précision élevée des pièces permet de réduire nettement les surépaisseurs d'usinage; par ailleurs, le débit du métal nécessaire pour les attaques est réduit. La quantité de travail nécessaire pour l'ébarbage et le façonnage ultérieur diminue également. Le procédé est utilisable pour la fabrication de pièces en métaux ferreux et non ferreux.

Le moulage en carapace présente de larges possibilités d'automatisation par la mise en œuvre des machines automatiques à postes multiples et au plateau carrousel pour la fabrication des moules,

des fours rotatifs circulaires pour la chauffe des modèles, par l'automatisation de l'étuvage des moules et d'autres opérations relatives à la confection des moules et à la coulée.

L'*ébavurage et l'ébarbage des pièces de fonderie* se font pour supprimer les jets de coulée, les masselottes, les bavures, les brûlures, les battitures, etc.

Les attaques et les masselottes des pièces en fonte sont enlevées au marteau. Celles des pièces en acier et en métaux non ferreux sont coupées aux scies à ruban ou circulaires, au burin mécanique ou au chalumeau coupeur. Les bavures, brûlures et autres irrégularités superficielles sont enlevées par burinage pneumatique ou par meulage. Pour chuter les jets et les bavures des pièces coulées sous pression, on emploie des outils d'ébavurage.

Le nettoyage des surfaces s'effectue à l'aide des appareils à grenailler à amenée mécanique de la grenaille. L'utilisation des tonneaux à dessabler et du sablage est à prohiber pour des considérations déjà exposées.

Façonnage des ébauches

Pour observer les spécifications géométriques, dimensionnelles et de l'état de surface, on fait appel généralement au façonnage des pièces.

En construction mécanique, le rôle dominant dans ce domaine revient toujours à la coupe (usinage par enlèvement de copeau). On applique également l'usinage sans enlèvement de copeau, qui consiste à réaliser une déformation plastique, ainsi que l'écrouissage par grenaillage.

La coupe est le mode d'usinage le plus usité actuellement dans le travail des ébauches des pièces mécaniques. Pour réaliser ce travail, en plus d'usinage on recourt également à l'ajustage. La part de ce dernier dans la fabrication en moyennes et grandes séries est infime, mais lorsqu'il s'agit des pièces unitaires et de petites séries, ainsi que des travaux de réparation, l'ajustage s'emploie largement pour réaliser les conjugaisons des pièces [1].

L'usinage par enlèvement de copeau sur des machines-outils s'effectue soit aux outils à arête tranchante (outils, fraises, forets, forets-aléseurs, alésoirs, broches, etc.), soit à la meule (meules, pierres).

Les *procédés de l'usinage à l'outil* sont le dégrossissage, l'ébauchage, la semi-finition et la finition. Lorsque la pièce brute est précise, on se limite parfois à une seule opération d'usinage à l'outil. L'usi-

[1] Les travaux d'ajustage et leur mécanisation sont étudiés dans le § 2 de ce chapitre qui porte le titre « Caractéristique des modes opératoires d'acsemblage ».

nage fin s'emploie pour assurer un dimensionnement précis et un bon état de surface.

Le dégrossissage est appliqué surtout aux pièces obtenues par forgeage libre ou aux grosses pièces venues de fonderie de la IIIe classe de précision. Cette opération a pour but de réduire les écarts de position et les défauts de forme de la pièce brute. La précision que permet de réaliser le dégrossissage correspond à la 10e ou 11e classe pour les pièces venues de forge et à la 9e ou 10e classe pour les pièces venues de fonderie.

Le dégrossissage admet qu'il reste des aires brutes localisées de la surface travaillée. Dans le cas de pièces lourdes, le plus avantageux est de réaliser le dégrossissage dans les usines ou les ateliers producteurs. Dans ces conditions, les défauts superficiels sont révélés sur place, le poids de l'ébauche à transporter diminue et la durée du vieillissement naturel augmente.

L'ébauchage s'emploie pour des pièces dégrossies (grosses pièces matricées du deuxième ou troisième groupe de précision et grosses pièces venues de fonderie de la IIIe ou IIe classe de précision) ; dans le premier cas la précision assurée varie de la 9e à la 7e classe, et dans le second, de la 7e à la 5e classe.

Les états de surface obtenus se situent entre la 1re et la 3e classe.

L'objectif de la semi-finition est de façonner des ébauches dont la surépaisseur n'a pas été enlevée complètement par l'ébauchage ou lorsque les spécifications de la géométrie et des écarts de position sont serrées.

Dans le cas de la semi-finition, les tolérances des cotes vont de la 5e à la 4e classe ; l'état de surface varie de la 2e à la 4e classe.

La finition est soit une opération terminale, soit une opération intermédiaire précédant l'achèvement (usinage fin, rectification). La finition assure la 4e ou la 3a classe de précision et la 4e ou la 6e classe d'état de surface.

L'usinage en une opération s'emploie pour les ébauches obtenues par des procédés précis (estampage assurant le premier groupe de précision, moulage en coquilles, moulage à la cire perdue, etc.). L'outil façonne alors les surfaces brutes mais aux régimes s'apparentant à ceux de la finition.

La précision réalisée par ce mode varie en fonction de la précision de l'ébauche et va de la 4e à la 5e classe ; l'état de surface varie de la 3e à la 5e classe.

Si la précision imposée n'autorise pas l'usinage en une opération, ce dernier s'emploie comme une opération préalable suivie d'un usinage fin ou d'une rectification.

L'usinage fin à l'outil est utilisé pour l'achèvement susceptible de remplacer la rectification et réalisé à des vitesses de coupe élevées,

pour de faibles profondeurs (0,05 à 0,5 mm) et de faibles avances (0,05 à 0,15 mm/tr).

Le tournage fin assure la 2a ou la 3e classe de précision et la 7e ou la 8e classe de l'état de surface.

Une précision élevée et un bel état de surface obtenus par un usinage fin sont dus aux conditions spécifiques de l'opération. Les machines-outils affectées à ce genre de travaux sont très robustes et se distinguent par une géométrie très précise, alors que la tenue à l'usure des outils est très élevée.

Le réglage de la mise à la cote de l'outil et de la machine se fait à l'aide des verniers et des comparateurs avec une précision très poussée.

L'effort produit par la coupe avec de faibles profondeur et avance est peu important et constant; pour le lot d'ébauches considéré, les variations en service des valeurs de refoulement dans le système machine-pièce-outil se trouvent ainsi réduites au minimum.

Dans ces conditions toutes les composantes des tolérances d'usinage diminuent.

Il convient de signaler notamment le tournage et le rabotage fins à l'*outil pelle.* La profondeur de coupe ne dépasse pas alors 0,5 mm, et l'avance est désignée suivant la largeur de l'outil; généralement l'avance par tour ou par battement (dans le rabotage) ne dépasse pas 0,8 de la largeur de l'outil.

L'usinage fin à la pelle assure la 3e ou la 2a classe de précision et la 6e ou la 8e classe d'état de surface; dans les travaux unitaires, ce même mode de fabrication assure la 2e et même la 1re classe de précision, et la 7e ou la 9e classe d'état de surface.

Les outils conçus par le tourneur novateur V. Kolessov sont très productifs et assurent un état de surface de la 4e à la 5e classe pour une profondeur de coupe de 4 mm, une avance de 3 mm/tr et une vitesse de 60 à 150 m/mn, et jusqu'à la 7e classe, pour une profondeur de coupe de 1 mm, une avance de 5 mm/tr et une vitesse de 90 à 300 m/mn.

Dans le travail à la fraise on distingue le fraisage d'ébauchage, de semi-finition et de finition, complété par le fraisage fin dans le cas des fraises en bout; parfois on se borne au fraisage en une opération.

L'ébauchage s'emploie comme un mode d'usinage préalable des pièces venues de fonderie ou de forge dont la surépaisseur dépasse 3 mm. Les plans sont exécutés suivant la 2e ou la 4e classe d'état de surface, le défaut de rectitude étant de 0,15 à 0,3 mm par m.

Lorsque les défauts de la pièce brute impliquent une profondeur de coupe importante, on recourt à la semi-finition. La tâche d'enlever le copeau incombe alors à l'ébauchage et à la semi-finition. Ce mode opératoire est appliqué également pour réduire les défauts de la géométrie et des écarts de position, car chaque passe de l'outil

les diminue. L'état de surface dans ces conditions se situe entre la 3ᵉ et la 5ᵉ classe et le défaut de planitude est de 0,1 à 0,2 mm par m.

La finition peut s'employer pour achever la pièce après le fraisage d'ébauche et de semi-finition, ou comme une opération intermédiaire entre l'ébauchage et l'achèvement.

L'état de surface qu'elle permet de réaliser varie de la 4ᵉ à la 6ᵉ classe et les défauts de planitude, de 0,04 à 0,08 mm par m.

Le fraisage fin est un procédé d'achèvement des plans par des fraises en bout. La surépaisseur imposée varie dans ce cas de 0,2 à 1 mm. Le fraisage fin assure de la 6ᵉ à la 8ᵉ classe d'état de surface, les défauts de planitude étant compris entre 0,02 et 0,04 mm par m.

Le fraisage en une opération est appliqué lorsque les défauts de la pièce brute permettent de limiter la surépaisseur à 2 mm ou moins. Ce mode de travail assure alors la 4ᵉ ou la 5ᵉ classe d'état de surface et le défaut de planitude compris entre 0,06 et 0,1 mm par m.

L'application des procédés rapides de fraisage permet d'obtenir un état de surface variant de la 3ᵉ à la 5ᵉ classe pour l'ébauchage, de la 4ᵉ à la 6ᵉ classe pour la semi-finition et de la 5ᵉ à la 7ᵉ classe pour la finition.

Le *perçage* s'emploie pour exécuter des trous dans une pièce pleine. Il assure la 5ᵉ ou la 4ᵉ classe de précision et la 5ᵉ ou la 3ᵉ classe d'état de surface. Ce mode d'usinage s'emploie souvent pour l'exécution préalable des trous précis.

Les trous bruts sont souvent taillés par la seule opération de perçage.

L'*exécution des trous au foret-aléseur ou à la fraise* s'emploie soit après le perçage, soit pour l'usinage des trous venus bruts de fonderie ou poinçonnés dans des pièces brutes. Dans le premier cas, le foret-aléseur enlevant une partie importante de la surépaisseur corrige les défauts, et, notamment, l'écartement de l'axe du trou et le déplacement des axes des trous coordonnés. Cet effet est obtenu par l'emploi d'un guide de perçage. Dans le deuxième cas la fraise améliore la géométrie du trou et corrige son axe. Le fraisage des trous venus bruts de fonderie ou poinçonnés dans des pièces brutes permet d'obtenir la 5ᵉ classe de précision et la 3ᵉ classe d'état de surface. Après le perçage, ce mode de travail assure la 4ᵉ classe de précision et la 4ᵉ classe d'état de surface. Le fraisage rapide en une opération avec arrosage des trous venus bruts de fonderie exécutés dans des pièces en fonte grise donne la 4ᵉ classe de précision et la 4ᵉ ou 5ᵉ classe d'état de surface.

L'*alésage* des trous est appliqué généralement soit comme un mode de finition soit comme un mode précédant la superfinition (hönning). L'exécution de l'alésage ne corrige pas l'écartement et

le déplacement de l'axe du trou ; il ne se fait que dans le but d'assurer à la cote diamétrale une dimension précise.

Suivant les prescriptions auxquelles le trou doit répondre, on distingue l'alésage ébauche, l'alésage finition et l'alésage fin. Ces modes diffèrent essentiellement par les tolérances affectées aux diamètres des alésoirs.

La précision réalisée par l'alésage ébauche correspond à la 3a ou la 3e classe et l'état de surface, à la 6e classe (les alésoirs se font suivant la 2a classe de précision) ; l'alésage finition pousse la précision à la 2a classe et l'état de surface à la 7e classe (les alésoirs sont exécutés suivant la 2e classe de précision) ; l'alésage fin permet de réaliser la 2e ou la 1re classe de précision et la 8e classe d'état de surface (les tolérances affectées aux cotes des alésoirs correspondent à 0,6 de la valeur des tolérances de la 1re classe de précision).

Les trous précis de la 2e et de la 1re classe d'un diamètre de 25 à 600 mm sont finis avec des lames flottantes. Ces lames sont montées dans des rainures de l'outil et peuvent se déplacer dans le sens radial.

L'opération ne redresse pas ni change l'axe du trou qui est défini par l'usinage antérieur ; elle ne fait que rendre le diamètre du trou encore plus précis et améliorer l'état de surface.

Le *brochage* s'emploie pour le façonnage des trous et des rainures de section quelconque, des surfaces planes et courbes, et des surfaces de révolution extérieures.

Ce mode opératoire simplifie l'usinage et permet dans de nombreux cas de remplacer plusieurs outils par une seule broche (le foret-aléseur ou l'outil à aléser et l'alésoir ; les fraises d'ébauchage et de finition, par exemple). Les trous à brocher peuvent être bruts ou usinés au préalable.

Le brochage des trous est un mode d'usinage qui connaît une large extension grâce à sa productivité élevée.

Lorsque l'ébauche a un bout dressé, ce bout est serré à la surface frontale de la brocheuse. Dans le cas d'un bout brut, ce bout repose sur une butée à rotule orientable.

Le brochage des plans se fait sur des machines à brocher verticales ou horizontales, la pièce étant serrée sur un montage.

Les surfaces de révolution extérieures sont façonnées sur des machines à brocher spéciales qui prévoient la rotation de la pièce, alors que les surfaces curvilignes se façonnent sur des machines à table tournante. On recourt au brochage pour l'exécution des couronnes d'engrenages.

Le brochage est un procédé prometteur susceptible d'être réalisé sur des machines très variées, y compris sur des machines-transferts. Ce mode opératoire permet d'assurer la 3a ou la 2a classe de précision, et la 5e ou la 7e classe d'état de surface.

Pour finir des trous de faible longueur d'une forme quelconque en assurant la 2e classe de précision et même une précision plus poussée, ainsi que la 7e ou 8e classe d'état de surface, on recourt à des broches courtes spéciales qui sont poussées à travers le trou et qui travaillent par compression.

La *rectification* est un mode de finition.

La rectification de dégrossissage sert à façonner en une opération les plans de référence pour leur assurer la planitude requise et, généralement, sans observer les spécifications dimensionnelles.

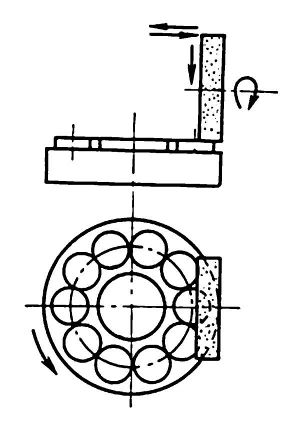


Fig. 109. Rectification d'un plan par la périphérie d'une meule sur une machine à table pivotante

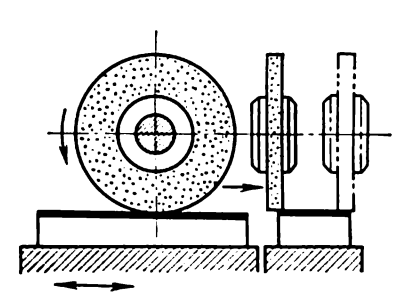


Fig. 110. Rectification d'un plan par la périphérie d'une meule sur une machine à table animée d'un mouvement alternatif

L'opération se fait sur des rectifieuses à broche verticale avec une meule segmentée. La grosseur de grain courante s'échelonne de 16 à 24, plus rarement de 24 à 36. La rectification de dégrossissage permet de réaliser la 5e ou la 6e classe d'état de surface.

La rectification d'ébauchage des plans après le façonnage à l'outil tranchant se fait par la périphérie (fig. 109 et 110) ou par la face d'une meule (fig. 111 et 112). Dans le premier cas on emploie des meules à grain de 36 à 46, et dans le deuxième, de 24 à 36 (pour l'acier et la fonte). La rectification de finition s'effectue avec des meules à grain de 46 à 90, et la rectification fine, avec des meules à grain de 120 à 180.

La rectification plane par la périphérie d'une meule permet d'obtenir en ébauche la 5e ou la 6e classe, en finition la 7e ou la 8e classe et en rectification fine la 8e ou la 9e classe d'état de surface. La rectification rapide des plans par la périphérie d'une meule améliore d'une classe l'état de surface. Dans le cas de la rectification des

plans par la face d'un boisseau, l'état de surface obtenu varie de la 5e à la 7e classe pour l'ébauchage et de la 7e à la 9e classe pour la finition.

Pour la rectification des surfaces cylindriques extérieures on recourt à l'ébauchage, la finition et la rectification fine. L'ébauchage assure la 3a ou la 3e classe de précision et la 5e ou la 7e classe d'état de surface; la finition, la 2a ou la 2e classe de précision et la 7e ou la 8e classe d'état de surface, et la rectification fine, la 2e à la 1re classe de précision et la 8e à la 10e classe d'état de surface.

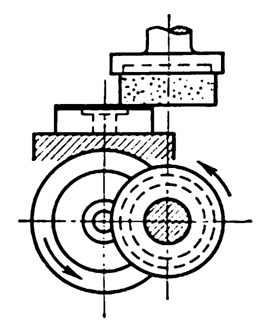


Fig. 111. Rectification d'un plan par la face d'une meule boisseau sur une machine à table pivotante

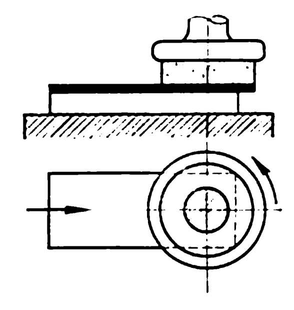


Fig. 112. Rectification d'un plan par la face d'une meule boisseau sur une machine à table animée d'un mouvement alternatif

La rectification en une opération des surfaces de révolution extérieures est appliquée aux pièces ne subissant pas de traitement thermique après le tournage; elle leur communique la 3e ou la 2a classe de précision et la 6e ou la 8e classe d'état de surface.

Pour l'usinage des trous on emploie trois modes de rectification : l'ébauchage, la finition et l'usinage en une opération. L'ébauchage permet d'obtenir la 3a ou la 3e classe de précision et la 5e ou la 7e classe d'état de surface. La finition et le travail en une opération assurent la 3e ou la 2a classe de précision et la 7e ou la 8e classe d'état de surface.

Dans l'usinage des trous, la rectification fine ne s'emploie pas; lorsqu'une précision poussée et un bel état de surface sont de rigueur, la rectification à la meule est remplacée par d'autres modes d'usinage à l'outil ou à l'abrasif, et, notamment, par le tournage fin, l'alésage ou le rodage.

Le *rodage mécanique ou le pierrage* (hönning) est réalisé par une tête de rodage qui porte des bâtons-rodoirs spéciaux (fig. 113). La tête est animée simultanément d'un mouvement rotatif et d'un mouvement de translation alternatif; les grains d'abrasif laissent à la

surface de la pièce un réseau fin de stries obliques (fig. 114). Bien que l'état d'une telle surface soit beau, elle retient bien le film d'huile.

L'épaisseur de la couche enlevée par rodage varie de 0,01 à 0,2 mm suivant le diamètre du trou, le matériau et l'usinage antérieur. C'est la limite des défauts de conicité, d'ovalisation, etc., que le rodage permet de corriger.

Pour prévenir la diminution éventuelle des diamètres des trous au droit de leur débouché, les bâtons-rodoirs doivent en sortir quelque peu (consigne réalisée par le chevauchement des bâtons) ; ce procédé est donc commode pour l'exécution des trous débouchants. Son application est plutôt difficile pour l'exécution des trous dont le diamètre est plus petit que la longueur.

Le rodage peut se faire en une, deux ou trois opérations avec des bâtons au grain différent ; pour le rodage en une opération, le grain varie de 270 à 400 ; pour l'ébauchage, de 140 à 270 ; pour la finition, de 300 à 500, et pour réaliser un poli spéculaire, de 600.

Les têtes sont susceptibles de recevoir un à huit bâtons d'une largeur de 4,5 à 15 mm, d'une hauteur de 6 à 14 mm et d'une longueur de 150 mm.

Les éléments de régime sont les suivants : vitesse périphérique des bâtons, 45 à 90 m/mn ; vitesse de la translation alternative, 10 à 20 m/mn ; pression spécifique des rodoirs, 4 à 5 kg/cm^2 pour l'ébauchage et 3 à 4 kg/cm^2 pour la finition. Comme lubrifiant on utilise le kérosène ou un mélange de kérosène et de 10 à 20 % d'huile pour machines.

L'épaisseur enlevée en un battement varie de 0,7 à 5 μ.

La précision assurée par le rodage mécanique se situe entre 5 et 20 μ et l'état de surface, entre la 8e et la 12e classe. On y recourt comme à un mode type d'exécution des trous de précision à bel état de surface.

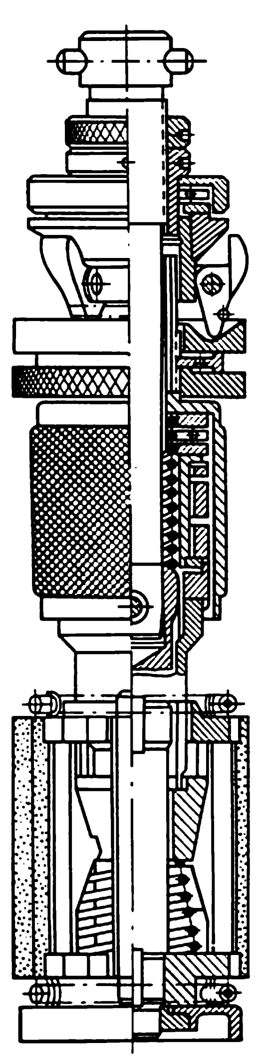


Fig. 113. Tête d'une machine à roder

Dans l'usinage des tourillons des arbres, le rodage mécanique ne s'emploie presque pas, car la rectification fine des surfaces extérieures est un mode opératoire plus simple assurant une précision et un état de surface suffisants. Pour obtenir

un meilleur état de surface des tourillons on recourt à la superfinition ou au polissage par ruban abrasif.

La *superfinition* est effectuée également par des têtes munies de bâtons spéciaux et peut être appliquée à l'usinage des surfaces de révolution intérieures et extérieures, ainsi que des plans.

La tête de superfinition porte deux à quatre pierres à grain de 320 à 600. La pression spécifique exercée sur la surface façonnée varie de 1,5 à 2,5 kg/cm². En service, les pierres se déplacent suivant une génératrice et font 200 à 1500 mouvements oscillatoires par minute avec une amplitude de 3 à 6 mm, alors que la pièce tourne à une vitesse voisine de 10 m/mn. L'opération dure 0,5 à 1,5 mn.

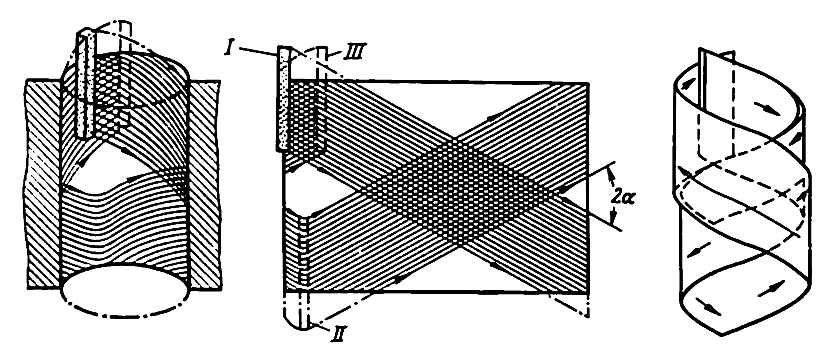


Fig. 114. Surface rodée:

I — position d'un bâton-rodoir au départ de la première course aller; *II* — position du bâton-rodoir à la fin de la première course aller; *III*—position du bâton-rodoir à la fin de la première course retour; 2α — angle intérieur d'intersection

La superfinition ne fait qu'améliorer l'état de surface en le poussant jusqu'à la 9ᵉ ou 12ᵉ classe sans corriger d'autres défauts produits par l'usinage antérieur. Les faibles vitesses et pressions spécifiques, caractéristiques de ce mode d'usinage, rendent impossible un échauffement éventuel des surfaces et donc les modifications quelconques dans leur couche superficielle. L'amélioration de l'état de surface est favorisée par la multiplicité des mouvements qui exclue pratiquement la répétition des trajectoires déjà tracées par les grains d'abrasif. L'opération se déroulant avec un lubrifiant constitué de kérosène et de 10 à 15 % d'huile pour broches, les pierres n'entrent en contact avec les rugosités que là où le film d'huile est rompu; lorsque l'état de surface atteint une certaine valeur, l'opération cesse d'elle-même par suite d'absence de ruptures dans le film d'huile.

Le *lapping* (rodage à l'aide de poudre abrasive) permet de réaliser une précision très poussée allant jusqu'à 0,1 μ et nettement supérieure à la 1ʳᵉ classe, et un état de surface de la 10ᵉ à la 12ᵉ classe; si la

nécessité se présente, l'état de surface obtenu peut être encore meilleur. L'outil est généralement constitué d'un matériau plus doux que celui de la pièce traitée. La matière constitutive des rodoirs est généralement une fonte à grains fins, des métaux non ferreux, des matières plastiques ou du bois. Le rodage est assuré par l'emploi des poudres abrasives et des pâtes. La surface du rodoir est chargée d'abrasifs à grains fins (poudres à roder, poudres à grains très fins et pâtes). Pour charger les rodoirs en poudres à roder, il est recommandé de ne pas employer un grain inférieur à 220, et pour les charger en poudres très fines, un grain supérieur à M7 (grains ne dépassant pas 7 μ). Il existe trois pâtes GOI (proposées par l'Institut d'optique d'Etat), qui se distinguent par la grosseur des grains d'oxyde de chrome (gros, moyens, fins), élément abrasif de la pâte, et par la composition chimique d'autres composantes. Le lapping ou rodage prévoit généralement l'ébauchage et la finition.

Le rodage d'ébauchage enlève la surépaisseur nécessaire pour corriger les défauts de forme ; la finition améliore l'état de surface. Ces deux modes opératoires sont exécutés avec des outils différents car il est difficile d'enlever l'abrasif déjà porté sur le rodoir.

Le *polissage* dont le but est d'améliorer l'état de surface se fait à la bande abrasive animée d'un mouvement rapide et chargée généralement par des grains tendres ou à la meule tendre (feutre, coton, cotonnette, etc.) garnie de pâte de polissage. Le polissage pousse l'état de surface jusqu'à la 10e ou 12e classe, et le polissage fin rend l'état de surface encore meilleur.

L'usinage des surfaces avec des pâtes de rodage et de polissage est fondé sur l'action simultanée mécanique de l'outil (rodoir ou meule tendre de polissage) et chimique des agents tensio-actifs contenus dans les pâtes.

L'académicien I. Grébenchtchikov a établi dans ses travaux qu'en usinage les acides contenus dans les pâtes, la chaleur qui se dégage et autres facteurs favorisent la formation à la surface des pellicules d'oxydes. Ces pellicules sont enlevées par l'action de l'abrasif ou de la meule à polir ; d'autres pellicules d'oxydes apparaissent pour être éliminées à leur tour, et ainsi de suite ; dans les creux, le métal reste couvert par ces pellicules, alors que sur les rugosités, elles sont enlevées à mesure de leur formation ; il en résulte que le polissage lisse les rugosités. A la différence du rodage le polissage n'améliore pas la précision d'usinage. Il en est ainsi parce que la cinématique du polissage n'assure pas la constance du régime d'usinage et ne permet pas de contrôler la marche de l'opération.

L'usinage mécano-chimique dans une solution de sulfate cuivrique s'emploie en pratique pour l'affûtage et l'achèvement des outils ; ce procédé permet d'obtenir un état de surface de la 8e à la 11e classe.

La réaction chimique d'échange qui se déroule à la surface d'un carbure dur plongé dans un mélange de la solution du sulfate cuivrique et de la poudre abrasive conduit au dégagement du cuivre, alors que le liant métallique (cobalt) du carbure dur passe dans la solution sous forme de sel, en libérant les grains de carbures; ceux-ci sont éliminés avec le cuivre poreux à l'aide d'une poudre abrasive portée par un disque métallique appliqué à la surface usinée; l'opération est reprise jusqu'à ce qu'on obtient l'état de surface imposé.

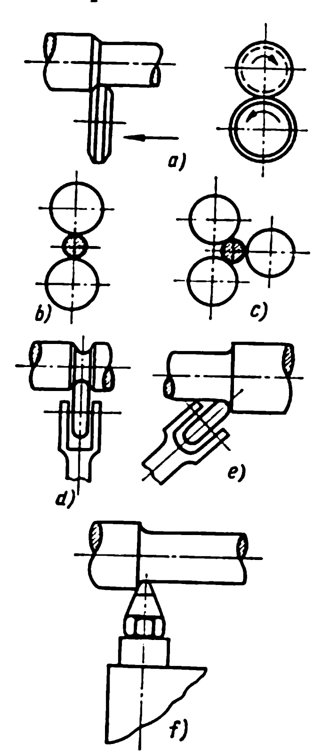


Fig. 115. Galetage des surfaces courbes extérieures: *a* — au galet; *b* — par deux galets; *c* — par trois galets; *d* — galetage d'une gorge; *e* — galetage d'un congé; *f* — galetage à la bille

Le **rodage liquide** a pour but d'améliorer l'état de surface sans modifier la forme et les dimensions. Le procédé consiste à refouler une poudre abrasive très fine en suspension dans un liquide à travers une tuyère en carbure dur sous une pression de 6 atm; les grains d'abrasif qui frappent la surface à une grande vitesse lissent toutes ses rugosités. La teneur du mélange en poudre est de 30 à 50 % de son poids. Pour le moment, ce procédé n'est pas très usité dans l'industrie car son application présente certaines difficultés.

En construction mécanique on recourt toujours plus à **l'usinage sans enlèvement de copeau** par déformation plastique qui est un mode opératoire très productif employé pour finir des surfaces de révolution, et parfois des plans. Les modes opératoires respectifs sont le roulage des surfaces à la bille, le galetage au galet et le calibrage des trous par bille ou mandrin [1].

Le galetage des surfaces de révolution extérieures se fait par un ou plusieurs galets en acier trempé ou en carbure dur appliqués à la surface usinée avec une pression définie. Lorsque les surfaces à façonner sont petites, les galets peuvent être remplacés par des billes (fig. 115). Les pièces peu rigides sont le mieux façonnées par un jeu de plusieurs galets. Dans les cas courants, le galetage constitue une sous-phase exécutée

[1] Nous n'examinons pas ici l'exécution par roulage des filets et des surfaces cannelées, dentées et moletées.

sur des tours usuels, tours révolver ou à plateau carrousel. Il existe également des machines spéciales comme les tours à rouler, par exemple, employés pour le galetage des portées.

Le galetage d'une surface réduit ses dimensions à la grandeur de la déformation résiduelle; dans ces conditions l'état de surface s'améliore nettement, la dureté de la couche écrouie augmente et, pour certains régimes, la limite de fatigue du matériau est également repoussée. Pour accroître la résistance des pièces il est recommandé d'effectuer au galet ou à la bille le galetage des congés et des dégagements.

Les deux premières passes de galetage sont les plus efficaces; les passes ultérieures n'améliorent presque pas l'état de surface et les autres caractéristiques.

Les résultats du galetage sont définis par la pression exercée lors de l'exécution de l'opération. Une pression excessive donne lieu à des modifications défavorables dans la couche superficielle, qui par la suite peuvent entraîner la stratification du métal de base. Pour un galet d'un diamètre inférieur à 100 mm comportant une bande cylindrique d'une largeur de 3 mm cette pression doit varier, en fonction du matériau usiné, de 50 à 200 kg.

Le galetage des surfaces ayant subi la finition par des outils tranchants améliore l'état de surface d'une ou de deux classes et la précision de 10 à 15 % en assurant la 3[e] ou la 2[e] classe de précision et la 7[e] ou la 9[e] classe d'état de surface.

Le principe de galetage peut être également appliqué à la finition des surfaces de révolution intérieures, ainsi qu'à celle des surfaces d'autres types. Le galetage des trous se fait sur des tours usuels. tours révolver et à plateau carrousel, sur des perceuses verticales et radiales, ainsi que sur des aléseuses. L'efficacité technique et économique du galetage est grande surtout lorsqu'il est appliqué à l'usinage de gros trous pratiqués dans des pièces lourdes (bâtis, supports) qui se prêtent mal à l'usinage par abrasion.

Le calibrage des trous consiste à faire passer avec serrage à travers ces trous une bille ou un mandrin (fig. 116). Lorsque le quotient de la longueur l de l'ébauche par son diamètre d est supérieur à 8 ($\frac{l}{d} > 8$), le mandrin est tiré à travers le trou ou l'ébauche est tirée sur le mandrin fixe.

Le calibrage engendre des déformations élastique $\sigma_é$ et résiduelle σ_r.

On peut donc écrire:

$$\sigma_r = d_c - d_{éb}\,; \qquad \sigma_é = d_o - d_c \text{ et le serrage } i = d_o - d_{éb},$$

où d_o est le diamètre de l'outil;

$d_{éb}$, le diamètre du trou avant le calibrage (diamètre de l'ébauche) ;

d_c, le diamètre du trou calibré (fig. 117).

La précision d'un trou tourné ou alésé au préalable suivant la 3e ou la 2e classe est poussée par le calibrage jusqu'à la 2e ou la 1re classe de précision et la 7e ou la 10e classe d'état de surface.

L'usinage s'opère avec lubrification par du kérosène pour la fonte, et par de l'huile minérale pour l'acier et le bronze. Le calibrage

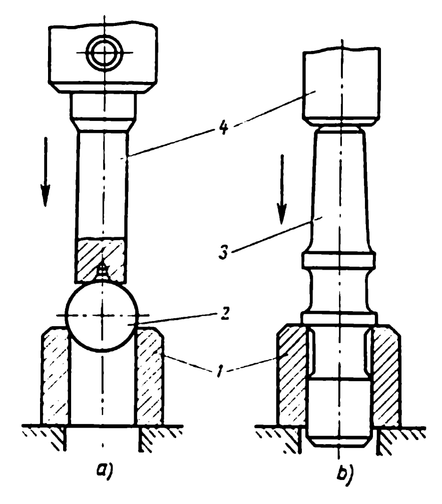


Fig. 116. Calibrage des trous:
a — à la bille ; b — au mandrin ; 1 — ébauche usinée ; 2 — bille ; 3 — mandrin ; 4 — poinçon

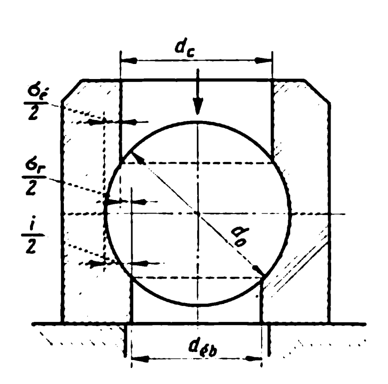


Fig. 117. Schéma de définition des déformations élastiques et résiduelles en calibrage

est un procédé efficace pour la finition des trous des ébauches dont la géométrie et les dimensions rendent incommode leur mise en place sur les machines d'usinage par abrasifs.

Le *grenaillage de précontrainte* (écrouissage par grenaillage) est un procédé prometteur de consolidation des pièces mécaniques. L'opération produit une déformation plastique des couches superficielles résultant de l'action dynamique de la grenaille.

Il consiste à attaquer après un traitement thermique la pièce usinée placée dans la chambre d'une installation spéciale par la grenaille de fonte ou, plus rarement, par la grenaille d'acier, de 0,4 à 2 mm de diamètre, projetée à une grande vitesse.

La précontrainte des métaux non ferreux est réalisée à l'aide de la grenaille d'aluminium ou de verre.

L'action dynamique de la grenaille produit un écrouissage qui pénètre à 0,2 ou 1 mm en profondeur de la couche superficielle de

l'ébauche tout en augmentant la dureté et la résistance de cette couche; la répartition des contraintes résiduelles suivant la section de la pièce devient plus favorable, la forme et l'orientation des cristaux se modifient en rendant plus efficace leur résistance à la déformation plastique et à la rupture; la susceptibilité de l'acier à l'entaille et aux défauts superficiels diminue brusquement. Dans les pièces en acier, l'écrouissage par grenaillage élimine l'action défavorable sur la fatigue de la décarburation de la couche superficielle.

Ce mode opératoire atténue d'une manière efficace la concentration des contraintes aux endroits les plus éprouvés: concentrateurs des contraintes dues à la fabrication (traces d'usinage), à l'exploitation (entailles, corrosion) et, lorsque la profondeur de la couche écrouie est suffisante, concentrateurs de contraintes fonctionnels (rainures, raccordements brusques entre les sections).

L'écrouissage par grenaillage modifie la microgéométrie de la surface; l'état de surface obtenu dans ces conditions est rendu plus mauvais par rapport à la rectification; la rectification ultérieure ne dépassant pas la limite des rugosités de la surface écrouie n'altère pas pratiquement l'efficacité du grenaillage; mais une rectification plus profonde peut réduire nettement la consolidation ainsi obtenue.

L'écrouissage par grenaillage se fait généralement avec des appareils à jet de grenaille métallique mécaniques ou pneumatiques.

Dans les installations mécaniques, la grenaille est projetée par des palettes plates réparties radialement sur un rotor animé d'une rotation rapide (2000 à 3500 tr/mn). Le diamètre du rotor varie de 200 à 500 mm, sa largeur, de 45 à 125 mm.

Par rapport aux appareils pneumatiques, les appareils mécaniques assurent un balayage plus régulier de la pièce traitée, une productivité plus élevée et une plus grande économie.

Dans les appareils pneumatiques, la grenaille est projetée par l'air comprimé sous une pression de 5 à 6 at à travers une ou plusieurs tuyères. Ces appareils s'emploient essentiellement lorsque les surfaces à écrouir présentent un accès difficile (trous profonds, creux, etc.).

La cabine d'un appareil à jet de grenaille comporte un mécanisme (transporteur, table rotative, etc.) qui communique à la pièce consolidée placée sous le jet le mouvement imposé.

La quantité de grenaille projetée par des installations modernes atteint 150 kg/mn.

Le grenaillage de précontrainte s'emploie pour élever la résistance à la fatigue de l'acier forgé et coulé, ainsi que de la fonte à résistance élevée. Ce procédé n'est pas utilisé pour la fonte grise. Mais appliqué aux assemblages soudés sollicités par des charges alternatives, il

accroît nettement leur résistance. Il augmente de 50 % en moyenne la limite de fatigue.

Combiné aux divers procédés de consolidation superficielle (trempe par haute fréquence, cémentation, revêtements superficiels, etc.), l'écrouissage par grenaillage est très avantagex.

Techniques d'usinage électrique

Suivant les caractéristiques technologiques du travail des surfaces on distingue l'usinage électro-chimique et l'usinage par étincelage.

Les procédés électro-chimiques sont définis par les phénomènes produits par le passage du courant électrique dans des électrolytes. On y rapporte le polissage électrolytique et le traitement anodique [1].

Le *polissage électrolytique* est basé sur une dissolution anodique hétérogène des secteurs isolés d'une surface rugueuse au cours de l'électrolyse. Deux électrodes sont placées dans un électrolyte, dont l'une est constituée par la pièce à polir (anode) et l'autre, par une plaque métallique (cathode) ; l'opération s'effectue en faisant passer par l'électrolyte un courant continu de faible tension.

La composition des électrolytes et les régimes de travail sont définis par le métal à polir. Les composants essentiels des électrolytes sont les acides orthophosphorique et sulfurique, la glycérine, l'anhydride chromique. Les régimes de polissage varient dans des limites très larges : la densité de courant de 0,02 à 120 A/cm^2, la durée de l'opération de 0,2 à 60 mn. L'uniformité du polissage dépend de la capacité de dissipation de l'électrolyte. L'aptitude au polissage varie suivant les métaux ; les meilleurs résultats sont obtenus avec des métaux et des alliages d'une composition et d'une structure homogènes.

Pour le régime optimal, l'intensité de l'enlèvement du métal varie de 0,1 à 10 μ/mn.

Pour appliquer un polissage électrolytique l'état de surface ne doit pas être inférieur à la 4e classe. La surface à traiter doit être au préalable soigneusement décapée.

Le polissage électrolytique permet d'améliorer l'état de surface de deux ou trois classes.

Le *traitement anodique* consiste à placer dans un électrolyte le métal à traiter; lorsque, dans ces conditions, on fait passer par l'électrolyte un courant continu, il se forme à la surface traitée une pellicule insoluble d'une épaisseur variant de centièmes de micron à quelques centaines de microns. Soumettant la couche ainsi

[1] La galvanoplastie et l'oxydation anodique se rapportent aux modes de revêtements des métaux et de ce fait ne sont pas examinées dans notre ouvrage.

obtenue à telle ou telle action mécanique, on effectue l'usinage nécessaire.

En plus du tronçonnage des métaux examiné dans ce qui précède [1], ce procédé peut s'employer pour affûter et finir les outils, réaliser des opérations analogues à la rectification et certains autres modes d'usinage. La précision obtenue par ce mode opératoire varie de la 4e à la 2e classe ; elle est définie surtout par la précision de l'outil et de la machine.

L'état de surface obtenu par l'usinage anodique va de la 2e à la 7e classe ; celui assuré par la rectification anodique, de la 6e à la 10e classe, et par l'achèvement, de la 9e à la 12e classe.

L'*usinage par étincelage* consiste à réaliser la destruction des métaux par une décharge électrique amorcée par impulsions lors du passage du courant à travers un diélectrique. La perturbation de la rigidité d'un diélectrique par un courant qui le traverse est dite rupture, alors que la destruction de la surface des électrodes entre lesquelles apparaît la décharge, l'électro-érosion. A la différence de l'arc électrique dont la décharge exerce une action thermique intense sur le métal de l'électrode, les sollicitations thermiques de l'étincelage n'affectent que des secteurs microscopiques ; la surface traitée de l'anode (ébauche usinée) est de l'ordre de 0,05 à 1 mm^2 alors que la profondeur est de 0,005 à 0,3 mm. Dans ces conditions, l'échauffement de toute l'ébauche est impossible.

Dans ce mode opératoire, la pièce est connectée généralement au pôle positif, alors que l'outil qui assure le guidage de la décharge, au pôle négatif d'un générateur d'impulsions. Les électrodes doivent être séparées par un entrefer nécessaire pour l'amorçage de la décharge. La grandeur de l'entrefer varie de 5 à 100 μ, suivant la puissance des impulsions.

L'usinage s'opère dans un milieu liquide (kérosène, huile minérale à faible viscosité, eau) qui assure l'évacuation (lavage) du métal détruit de la surface traitée.

Suivant l'usinage à effectuer, l'outil est animé soit d'un mouvement de translation, soit d'un mouvement de rotation et de translation, soit encore d'un mouvement oscillatoire et de translation.

La précision de l'étincelage est fonction du jeu produit par l'opération qui varie dans de larges limites (de 30 à 800 μ par côté) ; ce jeu dépend de la précision de la machine et de l'outil, du régime d'usinage ; il est indépendant des dimensions de la surface usinée. La grandeur totale du jeu s par côté est constituée de celle de l'entrefer et des dimensions des particules arrachées qui en parcourant le jeu amorcent des décharges supplémentaires et augmentent ainsi le jeu (fig. 118). La grandeur de l'entrefer est définie par la tension.

[1] Voir « Tronçonnage anodique », p. 164.

alors que les dimensions des particules arrachées le sont par la puissance de la décharge. Les trous ainsi obtenus ont une forme évasée vers le haut.

L'état de surface est fonction de la puissance de la décharge. Une décharge unitaire arrache à la surface usinée une particule de métal et laisse un cratère à peu près sphérique. Plus la décharge est intense, plus le cratère est grand, et donc, plus l'état de surface est mauvais. L'état de surface obtenu est déterminé par le régime d'étincelage et varie de la 1re à la 8e classe.

L'étincelage accroît la dureté de la couche superficielle (HR_C = = 69 à 72) jusqu'à une profondeur de 10 à 100 μ, qui acquiert une tenue à l'usure et à la corrosion très élevée.

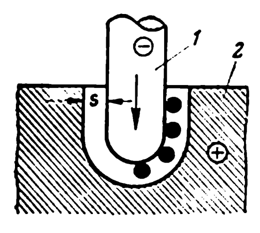


Fig. 118. Schéma d'établissement d'un jeu au cours de l'usinage par étincelage :

1 — outil constitué par une électrode ; 2 — ébauche façonnée

L'application de l'étincelage est avantageuse lorsqu'il est impossible de procéder par enlèvement du copeau. L'avantage essentiel de ce mode opératoire par rapport à la coupe est de pouvoir pratiquer des trous avec une électrode en fil de laiton ; des trous ainsi obtenus peuvent être débouchants ou borgnes de petits diamètres (0,15 à 0,3 mm), à section quelconque et à axe courbe ; en prenant pour électrode une plaquette ou un disque, on peut obtenir des fentes très étroites. Ce procédé est applicable à tous les matériaux, quelle que soit leur dureté, y compris les carbures durs. Pour accélérer l'exécution d'un grand nombre de trous lors de la fabrication des tamis, les électrodes en forme de fils sont fixées sur des plaques à des distances imposées formant ainsi une électrode combinée. L'exécution par ce procédé des filières d'étirage à profil compliqué les rend moins onéreuses et élargit nettement le domaine d'application de l'étirage à froid. L'étincelage s'emploie pour fabriquer et réparer des matrices, des montages d'usinage et des accessoires des machines-outils (pour l'extraction des outils brisés, par exemple), ainsi que pour réaliser l'affûtage et l'achèvement des outils.

Le procédé d'étincelage permet également de graver des métaux à l'aide d'un électro-graveur à main, dispositif électro-magnétique léger comportant une électrode oscillante couplée comme cathode au condensateur multiple ; l'anode est alors constituée par la pièce à graver. Ce mode opératoire peut également servir pour consolider la surface du métal ; l'action est due alors aux phénomènes physiques et chimiques se déroulant dans la couche superficielle sous l'effet d'impulsions brèves et multiples sous forme de décharges amorcées dans l'espace séparant l'anode (outil) et la cathode (pièce consolidée).

L'*usinage par ultra-sons* s'emploie pour l'exécution des trous de formes différentes aux axes courbes et rectilignes, l'exécution des filets dans de tels trous, le façonnage des gravures des matrices, l'ébavurage, la gravure ; il présente des avantages pour l'usinage des matériaux très durs et fragiles (acier trempé, carbures durs, diamants et autres pierres précieuses, verre, céramique, etc.).

Actuellement ce procédé n'a pas d'équivalent pour façonner les non-conducteurs. Dans le domaine du parachèvement il est supérieur à l'étincelage qui est son concurrent. Mais comme ces deux modes d'usinage ne sont qu'à leur stade d'étude, il est impossible de les classer définitivement.

La précision assurée par l'usinage ultra-sonique se situe entre 12et 3 μ, alors que l'état de surface H_{moy} varie de 0,8 à 0,2 μ, suivant la grosseur du grain d'abrasif employé.

La productivité que ce procédé permet de réaliser est définie par le matériau usiné, la grosseur du grain d'abrasif, le liquide dans lequel il se trouve en suspension, et la fréquence des oscillations. En choisissant pour unité la vitesse d'enlèvement du verre (100 mm^3/mn), les autres facteurs étant constants, la vitesse d'enlèvement de la céramique est de 0,13, de l'acier de diverses nuances et des carbures durs, 0,02 à 0,05, et du laiton, 0,06.

Pour rendre la vitesse d'usinage deux à trois fois plus rapide, il est possible de combiner l'usinage ultra-sonique au polissage anodique.

Nettoyage des pièces mécaniques et des ébauches en cours d'usinage

Avant de soumettre les pièces finies au contrôle, il faut les nettoyer soigneusement des traces laissées par le liquide d'arrosage, les copeaux et autres particules étrangères. Ce n'est que dans ces conditions que le contrôle peut être vraiment qualifié.

Avant de présenter les pièces au contrôle il est d'usage de les laver dans un bac ou une machine spéciale schématisée sur la figure 119. C'est une machine à une chambre dans laquelle les pièces (ensembles) *1* sont acheminées par des rouleaux jusqu'au transporteur qui les déplace dans la chambre à laver *2*; le détergent est refoulé par la pompe *3* sous une pression de 3 at ; après avoir lavé intensément les pièces de tous côtés, le détergent s'écoule dans le décanteur, passe par le filtre *4* et revient dans la pompe ; sa température variant de 60 à 80°, les pièces sèchent rapidement une fois sorties de la machine. Il existe également des machines à deux chambres ; la première assure le lavage, et la seconde le rinçage et le nettoyage des restes d'alcalis. Parfois les machines à laver comportent des chambres à sécher (machines à trois chambres).

Les détergents sont constitués de solutions d'huile soluble ou de savon liquide additionné de carbonate de soude et de verre soluble, ainsi que d'autres solutions analogues.

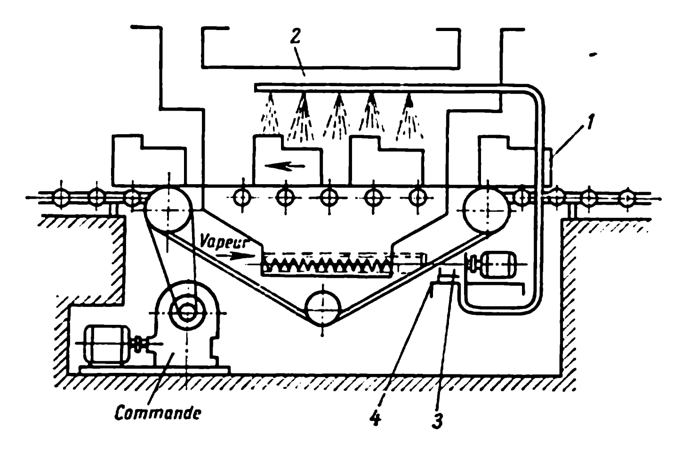


Fig. 119. Machine à laver à une chambre

Les grosses pièces (corps, bâtis, etc.) sont nettoyées à l'aide de brosses métalliques rotatives (d'un diamètre approximatif de 150 mm) (fig. 120), puis soufflées à l'air comprimé à travers les embouts des flexibles d'amenée d'air.

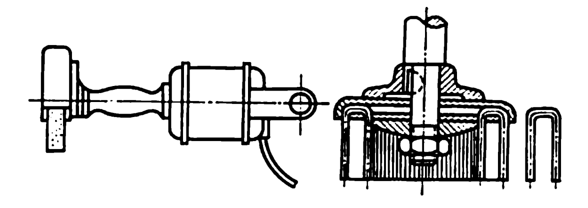


Fig. 120. Brosses métalliques mécaniques

Lorsqu'une vérification en cours d'usinage est prévue, les ébauches avant d'être contrôlées subissent également le lavage.

Dans l'industrie on recourt largement au nettoyage par ultrasons. Ce procédé rend aisé non seulement le nettoyage des surfaces extérieures, mais également celui des surfaces intérieures d'accès difficile (canalisations, sillons, etc.). Sa productivité et son efficacité le placent en tête des autres procédés de lavage et de nettoyage des pièces.

Le soufflage à l'air comprimé s'emploie largement lors de la mise en place des ébauches sur des machines-outils pour nettoyer des copeaux les éléments d'appui et de référence des montages et des ébauches ; si cette condition n'est pas observée, on peut compromettre une mise en place judicieuse.

Traitement thermique et thermochimique

Le traitement thermique se fait pour améliorer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques qui définissent les caractéristiques des métaux du point de vue technologique et d'exploitation. Ce phénomène se produit par suite des modifications de la structure et des phases du métal ainsi que du système des contraintes internes.

Traitement thermique de l'acier. Le *recuit complet* consiste à échauffer l'acier jusqu'à la température qui dépasse de 30 à 50° l'intervalle de transformation ; l'échauffement est suivi d'un maintien à cette température et d'un refroidissement lent jusqu'à la température de 400 à 500°. Le recuit complet s'emploie surtout pour traiter les laminés, les pièces forgées et coulées ; il diminue leur dureté, améliore leur usinabilité, réduit leur hétérogénéité structurale et prépare leur structure pour le traitement thermique ultérieur.

Le *recuit isotherme* prévoit l'échauffement de l'acier jusqu'à une température située dans l'intervalle de transformation ou supérieure, maintien à cette température et refroidissement accéléré jusqu'à une température inférieure à l'intervalle de transformation, maintien à ce niveau et, enfin, refroidissement définitif, généralement à l'air. Dans le cas de l'acier allié, le recuit isotherme diminue la durée de recuit complet ; ainsi, pour améliorer l'usinabilité de l'acier 40XHMA et obtenir l'état de surface imposé, on fait appel au recuit isotherme à la température de 760° avec un refroidissement rapide jusqu'à 635°, maintien à cette température pendant 4 à 6 heures et refroidissement à l'air.

Le *recuit d'adoucissement* consiste à chauffer l'acier jusqu'à une température située dans l'intervalle de transformation, le maintenir à cette température et le refroidir lentement jusqu'à une température inférieure à cet intervalle. Ce traitement améliore l'usinabilité et supprime les contraintes internes.

Le *recuit à basse température* se produit par échauffement de l'acier jusqu'à une température inférieure à l'intervalle de transformation, maintien à cette température et refroidissement généralement à l'air. Le but poursuivi par ce traitement est de supprimer les contraintes internes qui apparaissent dans les pièces forgées en acier allié après le dégrossissage.

Le *recuit d'homogénéisation* est l'échauffement de l'acier jusqu'à une température supérieure de 150 à 300° à l'intervalle de transformation, maintien prolongé à cette température et refroidissement lent. Ce traitement convient surtout pour de gros moulages d'acier allié, car il uniformise, par diffusion, l'hétérogénéité chimique (liquation). Pour affiner la structure dont les grains sont devenus trop gros, on recourt après ce traitement soit au recuit complet, soit à la normalisation.

Le *recuit de recristallisation* s'opère par échauffement de l'acier jusqu'à une température supérieure de 150 à 250° à celle de cristallisation (0.4 de la température de fusion, environ), maintien à cette température et refroidisse-

ment. C'est un traitement thermique intermédiaire prévu pour des pièces brutes laminées et estampées à froid dans le but de supprimer les contraintes internes et l'écrouissage, rendre au métal sa plasticité et sa ténacité, grossir les grains fragmentés par la déformation à froid (pour obtenir une structure équiaxiale), réduire la dureté et améliorer l'aptitude à subir le travail par déformation ultérieur.

La *normalisation* consiste à chauffer l'acier jusqu'à une température dépassant de 30 à 50° l'intervalle de transformation, maintenir à cette température et refroidir à l'air calme. Ainsi, le recuit de normalisation ne se distingue du recuit complet que par un refroidissement après maintien à la température de recuit. Il sert pour homogéniser la structure hétérogène des pièces en acier coulées et forgées, constituer une structure à grains fins, améliorer l'usinabilité des aciers à faible et moyenne teneur en carbone. De plus, la normalisation accroît la dureté et améliore les propriétés mécaniques de l'acier.

La *trempe* se fait par chauffage de l'acier jusqu'à une température située dans l'intervalle de transformation ou jusqu'à une température plus élevée, maintien à cette température et refroidissement rapide dans l'eau, les solutions aqueuses de sels, l'huile, les sels en fusion, et, parfois, dans un flux d'air (par soufflage). La trempe s'emploie pour élever la dureté, la tenue à l'usure et à la corrosion.

La *trempe superficielle* s'opère par échauffement rapide de la couche superficielle jusqu'à une température supérieure à l'intervalle de transformation, et son refroidissement rapide. Son objectif est d'obtenir une dureté élevée, d'accroître la résistance et la tenue à l'usure de la couche superficielle et repousser la limite de fatigue de la pièce. Le chauffage s'effectue à l'énergie électrique, à la flamme oxygazeuse ou par chauffage préalable des pièces dans un four ou dans un bain jusqu'à une température inférieure à l'intervalle de transformation, suivi d'un échauffement rapide dans un bain de plomb dont la température est nettement supérieure à celle de l'intervalle de transformation. Ce mode opératoire permet de chauffer la pièce à une profondeur déterminée (0,5 à 1,2 mm) jusqu'à la température imposée et de lui faire subir la trempe.

L'énergie électrique s'emploie pour assurer le chauffage par induction par haute fréquence, par fréquences accrue ou industrielle, le chauffage par contact ou dans un électrolyte.

Si pour chauffer la pièce on recourt à l'énergie électrique ou à la flamme oxygazeuse, on choisit généralement comme agent refroidisseur l'eau ou un mélange d'eau et d'air qui est projeté par un sprinkler pour baigner la pièce. L'huile ne convient pas car elle se cokéfie dans les trous de l'appareil.

La trempe superficielle est très avantageuse pour le traitement des tourillons des vilebrequins et des arbres à cames, des cames, des axes de piston, des arbres et des broches, des bielles de locomotive, des couronnes d'engrenages et d'autres pièces de ce type fabriquées essentiellement en aciers des nuances 40, 45, 50, 40X, 40XH, 45X, 40Г, 50Г, 45Г2.

La trempe superficielle des pièces d'une forme compliquée est parfois difficile et même impossible, si le chauffage est fait par haute fréquence. Aussi, est-il plus rationnel dans ces cas de faire appel à des traitements thermochimiques choisis suivant les spécifications imposées.

La trempe superficielle par haute fréquence est un procédé très productif, permettant de traiter, par exemple, plus de 60 vilebrequins à l'heure.

Le *revenu* consiste à chauffer un acier trempé jusqu'à une température inférieure à l'intervalle de transformation, le maintenir à cette température et le refroidir ensuite. Ce mode opératoire élève la ténacité, diminue la fragilité et les contraintes internes. Suivant la température, on distingue le revenu à haute, à moyenne et à basse température.

Le *revenu à haute température* (500 à 670°) améliore au maximum la plasticité et la ténacité tout en assurant une dureté suffisamment élevée.

Le *revenu à température moyenne* (250 à 450°) réduit les contraintes internes, améliore la plasticité et la ténacité, alors que la dureté, la charge de rupture et la limite élastique atteignent des valeurs plus importantes que lors du revenu à haute température.

Le *revenu à basse température* (150 à 250°) s'emploie pour diminuer les contraintes internes, tout en obtenant des valeurs importantes de dureté, de charge de rupture et de limite élastique, la valeur de la ténacité étant basse.

La *bonification* est un traitement thermique qui consiste à normaliser l'acier et à le soumettre ensuite à un revenu à haute température. On prête également ce nom à la trempe suivie d'un revenu à haute température. La bonification s'emploie pour affiner la structure, élever la ténacité, ainsi que pour préparer, au besoin, la structure à un traitement thermique définitif.

Pour réaliser le *vieillissement*, les pièces trempées sont portées à une température comprise entre 150 et 180° et maintenues à cette température pendant 5 à 25 heures. Le but du vieillissement est d'accélérer les transformations dans la masse d'un acier trempé pour assurer la stabilisation des dimensions et de la géométrie des pièces mécaniques de précision et des appareils de mesure.

Le *traitement à froid* consiste à placer les pièces ayant subi la trempe ou la trempe et le revenu dans un milieu dont la température varie généralement de —70 à —100°, les maintenir à cette température et les laisser s'échauffer naturellement jusqu'à la température ambiante. Ce procédé élève la dureté et la tenue à l'usure, assure la stabilisation des dimensions et de la forme des pièces.

Le traitement thermochimique consiste à saturer, par diffusion de divers éléments, les couches superficielles des pièces en acier, en modifiant ainsi la composition chimique de cette couche. Les procédés mis en œuvre à cet effet sont la cémentation (carburation), nitruration, cyanuration et carbonitruration, calorisation, chromage, siliciuration.

La *cémentation* courante (saturation de la couche superficielle en carbone) se fait par chauffage jusqu'à 890 ou 930° dans un milieu carburant (cément), maintien à cette température pendant 1 à 25 heures suivant la profondeur imposée et le cément, et refroidissement rapide, si l'opération est suivie directement par la trempe, ou lent, si elle ne l'est pas.

Après la trempe et le revenu à basse température, la cémentation accroît nettement la dureté et la tenue à l'usure de la couche superficielle, ainsi que la limite de fatigue de la pièce.

On distingue la cémentation par céments solides, liquides ou gazeux.

Les céments solides se composent d'une matière riche en carbone (charbon de bois, coke de pétrole, coke de tourbe), des activateurs (sels) et d'un liant (mélasse, amidon).

La cémentation liquide s'opère dans un bain constitué d'un mélange de sels fondus. La cémentation gazeuse a lieu dans un milieu gazeux constitué de gaz carburants (méthane, oxyde de carbone).

La teneur en carbone des aciers susceptibles de cémentation ne dépasse pas 0,35 %.

La *nitruration* (saturation de la couche superficielle de l'acier en azote) se fait par échauffement dans un milieu constitué d'ammoniac en portant la température de 480 à 650°, maintien à cette température pendant un temps qui est fonction de la profondeur de nitruration imposée et refroidissement lent.

Ce procédé est appliqué surtout pour traiter des pièces mécaniques en acier allié, ainsi que des pièces sollicitées par le frottement et les charges alternatives.

La nitruration repousse la limite de fatigue de l'ensemble de la pièce et améliore la dureté et la tenue à l'usure et à la corrosion de sa couche superficielle.

La *cyanuration* (saturation simultanée de la couche superficielle de l'acier en azote et en carbone) consiste à chauffer les pièces dans un milieu carburant et nitrurant, les maintenir dans ce milieu pendant un temps défini par la profondeur de la couche imposée, puis les tremper et les soumettre au revenu. La cyanuration s'emploie pour élever la dureté et la tenue à l'usure de la couche superficielle, ainsi que pour repousser la limite de fatigue de la pièce.

Le mode opératoire est déterminé par la destination des pièces; la cyanuration peut se faire à basse température (500 à 560°; outils en acier rapide) et à haute température (750 à 850°; pièces mécaniques en acier de construction) dans un milieu solide, liquide ou gazeux.

La *calorisation* se fait pour saturer la couche superficielle en aluminium dans le but d'améliorer les propriétés réfractaires des pièces en acier (échappements des moteurs et pièces analogues).

La calorisation dans un milieu solide (pulvurulent) se fait en portant les pièces à une température de 900 à 1050° et en les maintenant à cette température le temps nécessaire pour obtenir une couche d'épaisseur imposée. La calorisation au gaz s'opère dans un tonneau où des morceaux de ferro-aluminium sont chauffés jusqu'à 600°, alors que les pièces traitées le sont de 900 à 1050°; dans ces conditions, on fait circuler du chlore qui passe par le ferro-aluminium pour aller vers les pièces. Pour obtenir une couche calorisée de 0,15 à 0,2 mm, l'opération doit durer 2 heures environ.

La *chromisation* consiste à saturer la couche superficielle en chrome pour élever la dureté ainsi que la tenue à l'usure, les propriétés réfractaires et la résistance à la corrosion des pièces en acier. Le chromage s'effectue dans un milieu solide (pulvurulent) porté de 900 à 1050°, et consiste à maintenir les pièces à cette température pendant 8 à 15 heures. La chromisation dans un milieu liquide ou gazeux n'a pas trouvé d'application.

La *siliciuration* est la saturation de la couche superficielle de l'acier en silicium dans le but d'accroître la résistance à l'oxydation à chaud (pratiquement jusqu'à 900°). Si le traitement se fait dans un milieu solide, la cuve est remplie de ferro-silicium ou de carbure de silicium en poudre; le chauffage assure une température de 1000 à 1100°. La siliciuration gazeuse consiste à placer les pièces dans des moufles ou des tonneaux contenant du carbure de silicium ou du ferro-silicium à raison de 0,1 du poids des pièces. Lorsque la température atteint 950 à 1050°, on fait passer du chlore par le four; la durée du maintien dans ces conditions dépend de la profondeur imposée de la couche à traiter; après le traitement, les pièces sont refroidies avec le four jusqu'à 200° dans un courant de chlore.

Le degré et l'allure de la déformation subie par un acier par suite d'un traitement thermique sont fonction de la valeur et du signe des contraintes résiduelles. Le chauffage et le refroidissement irréguliers engendrent des contraintes thermiques; quant à la marche irrégulière des transformations de structure, elles donnent également naissance à des tensions internes, mais cette fois structurales.

L'étude des déformations qu'entraînent les traitements thermiques est nécessaire pour assurer en usinage ultérieur l'enlèvement d'un copeau minimal.

Voici les facteurs qui déterminent l'apparition pendant les traitements thermiques des contraintes internes et des déformations qui leur sont associées: construction de la pièce, trempabilité de l'acier, grosseur du grain, température et uniformité de la chauffe, température du revenu, uniformité et vitesse du refroidissement, etc.

Ainsi, la cyanuration et la trempe des pignons d'acier de nuance 40X augmentent en fonction de la température le diamètre de la circonférence primitive (∅ 90,25 mm) de 56 μ à 760° et de 102 μ à 845°, c'est-à-dire de 0,062 et de 0,113 %. Les éprouvettes cylindriques trempées à l'eau s'allongent de 0,2 à 0,48 %, suivant la nuance de l'acier et la température de trempe. L'allure de la déformation est nettement influencée par le milieu de trempe; ainsi, la longueur des éprouvettes cylindriques de ∅ 10 × 100 mm augmente de 0,05 % à 800° et de 0,13 % à 950° dans le cas de la trempe à l'huile (acier 38XA); de 0,22 % à 800° et de 0,48 % à 950° dans celui de la trempe à l'eau; le diamètre du trou (54,67 à 54,63 mm) des pignons d'acier de nuance 40 augmente après la trempe à 820° à l'eau de 0,2 à 0,4 mm, c'est-à-dire de 0,55 % en moyenne, alors qu'après la trempe à l'huile, de 0,05 à 0,08 mm ou de 0,12 % en moyenne. Le diamètre (50 à 190 mm) des pignons à une couronne (acier 40X) après la trempe à l'huile à 815° augmente d'environ 0,1 %.

Le revenu des pièces trempées diminue les contraintes résiduelles ce qui diminue dans une certaine mesure la déformation; plus la température du revenu est élevée, plus la diminution de la déformation due à la trempe est importante.

En plus des facteurs signalés, la déformation des pièces cémentées produite par un traitement thermique est définie par la teneur en carbone de la couche cémentée et sa répartition en profondeur; le quotient de la profondeur de la couche cémentée par la section de la pièce; la relation entre les surfaces cémentées et celles qui ne le sont pas, etc. Une partie importante de la déformation totale des pièces cémentées produite par le traitement thermique est due à la cémentation; ainsi la diminution du diamètre des bagues en acier 20X (100 mm) par suite de la cémentation atteignait 350 μ.

La cémentation des engrenages produit, suivant des facteurs divers, soit la diminution, soit l'augmentation de l'épaisseur des dents tout en faussant le profil à développante de cercle.

Pour assurer la fabrication des produits acceptables et réduire le volume du métal à enlever par rectification après le traitement thermique, l'étude des pièces à traiter thermiquement doit imposer des spécifications dimensionnelles susceptibles de tenir compte des déformations qu'entraîne un tel traitement; la valeur et la direction des déformations doivent être établies empiriquement.

Les dimensions et la géométrie des pièces simples (arbres, bagues, plaques) sont corrigées après traitement thermique par dressage (dans le cas où il est admissible) ou par rectification. Pour réduire la quantité de travail nécessité par ces opérations, la chauffe des pièces pour la trempe et le revenu s'opère dans des dispositifs spéciaux; les pièces plates sont trempées dans des matrices spéciales

et les pièces cylindriques, dans des installations de trempe, dans lesquelles la trempe se fait par des rouleaux animés d'un mouvement rotatif.

Il est beaucoup plus difficile d'éliminer les déformations produites par le traitement thermique des pièces de forme compliquée, surtout dans le cas des aciers cémentables. Pourtant dans ce cas là également il est possible de prévoir certaines mesures. Pour réduire les déformations éventuelles, il est recommandé, notamment, de fabriquer des pièces de forme compliquée en aciers alliés et de les tremper à l'huile.

Le traitement thermique de la fonte grise. Le *vieillissement artificiel* a pour but d'éliminer les contraintes résiduelles dans les moulages de fonte par recuit avec échauffement lent jusqu'à 500 ou 550° à la vitesse de 50 ou 150°/h, maintien à cette température pendant 2,5 à 10 h, et refroidissement lent jusqu'à 250 ou 300° à la vitesse de 30 ou 50°/h.

Le *vieillissement naturel* est une opération très longue (nécessitant le maintien des moulages en réserve pendant 6 à 18 mois) qui n'assure qu'une élimination partielle des contraintes (30 à 35 %).

Le *recuit* s'opère pour éliminer les contraintes et réduire la dureté des pièces en les chauffant de 400 à 600° à la vitesse de 60 à 170°/h, les maintenant à cette température pendant 0,5 à 10 heures et les refroidissant pendant 5 à 24 heures. Le recuit de grosses pièces se fait à 850 ou 950°. Parmi les modes opératoires modernes il y a: 1) le recuit isotherme dans des bains de chlorure de baryum à la température de 1100 à 1150°; l'opération dure alors de 1 à 5 minutes; 2) l'échauffement par haute fréquence, la cémentite se décompose alors en 3 ou 5 secondes.

Le *recuit de normalisation* impose un chauffage de 870 à 920°, le maintien de 1 à 3 heures à cette température et un refroidissement à l'air; son but est d'élever la dureté du moulage.

La *trempe* impose les mêmes chauffage et maintien que le recuit de normalisation, mais suivis de refroidissement dans l'eau ou l'huile. L'objet de la trempe est le même que celui du recuit de normalisation. Après la trempe, le revenu est de rigueur.

La trempe isotherme consiste à chauffer jusqu'à 850 ou 950°, maintenir pendant 20 à 30 mn à cette température et tremper dans un bain de sel à la température de 250 à 400°; elle accroît la résistance, la tenue à l'usure et la dureté, tout en conservant une bonne usinabilité.

Le traitement thermique des métaux non ferreux 1) élimine les contraintes internes par recuit à basse température; 2) corrige l'hétérogénéité chimique et structurale par recuit prolongé à haute température; 3) améliore par trempe et vieillissement les propriétés mécaniques des alliages; 4) améliore par trempe et revenu de stabilisation les propriétés des pièces travaillant à des températures élevées.

Le régime du traitement est déterminé par la nuance de l'alliage ; le traitement thermique des alliages de cuivre ne s'emploie presque pas car les modifications des propriétés mécaniques qu'il entraîne sont négligeables.

Le nettoyage des pièces après le traitement thermique se fait par décapage dans des solutions acides suivi de lavage et de neutralisation, dégraissage électrolytique, dessablage par appareils à jet de sable ou à grenailler pour supprimer les battitures, lavage dans des tambours, des cuves ou des machines à dégraisser et nettoyer les sels et autres encrassements.

Exécution des revêtements des pièces mécaniques

Les objectifs et les modes d'exécution des dépôts portés sur les surfaces des pièces mécaniques sont très variés. En construction mécanique on recourt aux revêtements obtenus par électrolyse, à la métallisation par projection, à la peinture, aux vernis.

Les revêtements portés par électrolyse s'emploient pour protéger les pièces mécaniques contre la corrosion, les embellir et pour améliorer leur tenue à l'usure. Voici les principaux types de dépôts.

Le *zingage* (revêtement de zinc) s'emploie pour protéger contre la corrosion les pièces en acier en contact avec l'essence ou l'eau douce, portées à des températures allant jusqu'à 70° et travaillant dans des conditions climatiques variables ou dans une atmosphère polluée par les produits de combustion, les gaz sulfureux et autres.

Le *cadmiage* ou *cadmiumage* (protection par le cadmium) s'opère pour prévenir la corrosion des pièces et ensembles en contact avec l'eau de mer, ainsi que pour revêtir les contacts électriques.

L'*étamage* (dépôt d'étain) a pour but d'améliorer le rodage des pistons en aluminium, par exemple.

Le *plombage* (revêtement de plomb) protège contre la corrosion produite par l'acide sulfurique et les gaz sulfureux.

Le *cuivrage* (revêtement de cuivre) s'emploie pour protéger contre la corrosion les appareils chimiques et les contacts électriques; pour la fabrication du bimétal ; l'amélioration du rodage des surfaces soumises au frottement ; on y recourt également avant l'oxydation des surfaces et pour former un support pour le chromage, le nickelage et autres revêtements protecteurs et décoratifs.

Le *nickelage* (avec support de cuivre) est utilisé pour protéger et décorer, pour élever la dureté superficielle et la tenue à l'usure des pièces mécaniques soumises au frottement ; pour protéger contre la corrosion les appareils chimiques et électrochimiques en contact avec des solutions alcalines.

Le *chromage*, avec support de cuivre et de nickel, assure la protection et la décoration, tout en élevant la capacité réflectrice ; le chromage sans support accroît la dureté et la tenue à l'usure, corrige les défauts dimensionnels des pièces (chromage dimensionnel des pièces rebutées et dans le but de réparation) ; il s'emploie également pour protéger contre la corrosion les surfaces soumises au frottement ; les revêtements de chrome poreux améliorent le rodage et élèvent la tenue à l'usure des segments de piston et des cylindres.

Le *dépôt de laiton* sert de support aux revêtements de caoutchouc portés sur des pièces en acier et prévoyant une vulcanisation ultérieure, ainsi que pour assurer la protection avec effet décoratif et oxydation ultérieure.

L'*argentage* se fait pour accroître la réflexibilité des projecteurs et des réflecteurs des phares, améliorer l'aptitude des surfaces des contacts à laisser passer le courant électrique et protéger de la corrosion les appareils chimiques en contact avec des solutions alcalines.

Le *dépôt de radium* augmente la réflexibilité des pièces.

La *phosphatation* protège contre la corrosion les pièces en acier et en fonte, et sert parfois d'apprêt prévu pour recevoir une couche de vernis.

L'*oxydation* s'emploie pour assurer la protection des surfaces des pièces en acier et dans un but décoratif, ainsi que pour la coloration des pièces en aluminium.

La *sulfurisation du fer* a pour but d'améliorer la lubrification, éliminer les entailles, améliorer le rodage des pièces mécaniques pendant l'exploitation (segments de piston, soupapes, poussoirs, etc.).

Il arrive qu'on fait également appel à l'électrolyse en cours d'exécution d'une gamme de fabrication pour assurer une protection provisoire. Ainsi, avant de procéder à la nitruration des pièces en acier, on effectue l'étamage des surfaces qui ne doivent pas la subir ; pour protéger certaines surfaces de la carburation pendant la cémentation, on les soumet au cuivrage.

Dans certains modes d'usinage, caractérisés par des pressions élevées affectant les surfaces de contact (exécution des rainures dans des trous sous pression, par exemple), on recourt au revêtement de plomb qui sert de lubrifiant pour parer à la formation d'entailles.

L'épaisseur des revêtements est choisie en fonction des conditions de service des surfaces considérées. Pratiquement, elle varie dans des limites très larges, entre 5 et 100 μ et plus (dans le cas des surfaces en contact avec des solutions concentrées d'acide sulfurique, l'épaisseur du revêtement atteint 1000 μ).

Pour assurer une protection locale contre la cémentation (cuivrage) l'épaisseur du revêtement varie de 30 à 40 μ, et contre la nitruration, de 3 à 10 μ.

L'épaisseur totale des revêtements à couches multiples varie de 15 à 80 μ et s'élève à 120 μ s'il faut protéger des surfaces corrodées par des solutions alcalines.

Les surfaces prévues pour recevoir un dépôt par électrolyse doivent être soigneusement usinées, exemptes d'empreintes, de soufflures, de repliures dues au laminage ou au forgeage, des inclusions et de bavures. Avant l'électrolyse il est d'usage de les rectifier et parfois même de les polir. L'usinage doit être très soigné parce que l'électrolyse accentue tous les défauts de surface (bavures, stries, traits, soufflures, rugosités, aspérités), car la densité de courant est plus élevée sur les aspérités que dans les creux voisins; c'est pourquoi le dépôt de métal est plus important sur les saillies que dans les creux.

Une bonne adhésion de la couche déposée au métal de base, qui est l'impératif principal pour les revêtements par électrolyse, ne peut être obtenue que dans le cas d'un décapage minutieux des surfaces à traiter précédant l'électrolyse et ne laissant aucune trace d'oxydes et d'autres encrassements, de graisses surtout.

La *métallisation par projection* consiste à porter sur une surface le métal fondu pulvérisé par air comprimé et projeté à grande vitesse (100 à 150 m/s). Les particules du métal pulvérisé adhèrent entre elles et à la surface traitée, formant une couche poreuse. Dans ces conditions on n'observe ni le soudage ni la fusion des particules de métal pulvérisées entre elles et avec las urface traitée. L'opération modifie la structure, les propriétés physiques et la composition chimique du métal d'apport, car certains de ses éléments brûlent et le métal lui-même s'oxyde au contact de l'air.

La couche poreuse ainsi formée manque de plasticité, elle est fragile mais résiste bien à la compression (100 à 150 kg/mm^2).

La métallisation par projection est un moyen de protection à effet décoratif, qui s'emploie également pour obtenir un revêtement réfractaire et antifriction, ainsi que pour corriger les pièces usées (la correction se fait par usinage ultérieur sur des machines-outils) et les moulages défectueux.

Ce mode de revêtement est réalisé à l'aide d'appareils spéciaux (pistolets) dans lesquels le métal est fondu soit par une flamme oxyacétylénique (lors de la métallisation gazeuse), soit par l'arc électrique (lors de la métallisation électrique). Les pistolets usuels travaillent au fil métallique d'un diamètre de 2 mm; l'usage des appareils prévus pour l'utilisation du métal en poudre ou d'autres poudres fusibles est bien plus rare.

La préparation de la surface en vue de métallisation consiste à réaliser un dégraissage et un décapage dans des solutions détersives, à enlever la pellicule d'oxydes et à rendre la surface rugueuse par sablage ou tournage de dégrossissage afin d'assurer une bonne adhé-

sion mécanique. La métallisation par projection s'emploie non seulement pour réaliser le revêtement des métaux, mais aussi pour revêtir des pièces non métalliques.

Les *peintures* et les *vernis* s'emploient dans des buts décoratifs, ainsi que pour protéger les surfaces métalliques de la corrosion, et les pièces en bois de l'humidité et de la putréfaction. La protection par la peinture n'est appliquée que pour les surfaces des pièces qui travaillent à l'intérieur des machines, les surfaces intérieures des pièces en fonte baignées par l'huile (pour fixer la poussière de moulage) et celles des machines agricoles simples. Ce sont les cas où l'on ne porte qu'une seule couche (apprêt) ou deux couches (apprêt et peinture). Dans toutes les autres conditions, la peinture se fait en plusieurs couches recouvertes en fin d'opération par le vernis. Il existe également des peintures d'isolation résistant à l'action chimique et thermique, ainsi que des peintures ignifuges (pour le bois) portées en une ou plusieurs couches.

La protection est réalisée par la mise en œuvre des peintures à l'huile et des émaux, des émaux nitrocellulosiques, des vernis nitrocellulosiques, des émaux à base de résine glycérophtalique, des vernis à base de chlorure polyvinylique et pour les revêtements spéciaux, des vernis isolants, des vernis bakélite, des vernis et émaux réfractaires et d'autres peintures, émaux et mastics spéciaux.

Un revêtement est porté en trois étapes: 1) préparation de la surface; 2) réalisation de l'apprêt; 3) achèvement de la surface peinte. La préparation d'une surface prévue pour recevoir la peinture consiste à réaliser le décapage et le rebouchage de la surface en œuvre, l'exécution des couches intermédiaire et couverte de mastic et le polissage.

Le décapage a pour but d'éliminer les battitures et la rouille, les huiles et les crasses, ainsi que la vieille peinture. Les battitures s'enlèvent soit par action chimique (acides sulfurique ou phosphorique) avec lavage et neutralisation ultérieurs, soit par action mécanique (sablage ou grenaillage), par meulage ou brossage pneumatique ou électrique; les grosses pièces métalliques sont traitées au chalumeau oxyacétylénique spécial avec nettoyage ultérieur par brosse métallique.

Le nettoyage des traces d'huile et d'autres encrassements est réalisé dans des laveuses à jet ou des machines à laver, ou par revenu à la température de 350 à 650° dans des fours à gaz ou au pétrole.

La vieille peinture est enlevée soit par lavage (à cet effet on emploie la térébenthine, l'acétone, des solutions d'alcalis caustiques, etc.) et par grattage avec une palette, soit par sablage ou grenaillage, soit encore par brûlage au brûleur spécial suivi de grattage avec une palette.

Pour obtenir une pellicule poreuse on recourt à la phosphatisation, et pour obtenir une pellicule de protection, à l'oxydation; ces pellicules renforcent l'accrochage des couches portées.

Le rebouchage des surfaces métalliques s'opère par brasage qui assure l'apport du métal dans les empreintes, les sillons profonds, les traces des cordons de soudage et autres défauts analogues, et meulage ultérieur des surfaces brasées sur des machines-outils ou avec des outils pneumatiques ou électriques, suivant l'encombrement du produit à traiter.

Pour reboucher les surfaces des pièces en bois il faut combler les trous laissés par les branches et les accumulations de résine qu'il faut enlever au préalable, puis coller les faces; pour éliminer les poils du bois on mouille la surface à l'eau pour la polir avec du papier de verre.

La couche intermédiaire (apprêt) est portée sur une surface nettoyée et rebouchée pour assurer son accrochage avec la couche de revêtement qui sera portée ensuite. La couche d'apprêt doit être anticorrosive, imperméable et élastique. Pour l'exécution des couches intermédiaires on emploie des apprêts au vernis ou à l'huile à base de bitume.

Le mastic est porté sur une surface déjà apprêtée avec une palette en bois ou en acier. La profondeur de la couche ne doit pas dépasser 0,5 mm; chaque couche doit être séchée avant qu'on n'en porte une autre. Le nombre de couches est défini par la qualité de la surface; il doit être le plus petit possible pour ne pas altérer la résistance du revêtement. Les mastics les plus usités en construction mécanique sont les mastics au vernis et nitrocellulosiques à séchage rapide.

Pour lisser les aspérités d'une surface mastiquée et séchée, on opère par meulage humide ou à sec, généralement avec un outil mécanique. Après le meulage humide, la surface est lavée à l'eau, essuyée avec des chiffons ou de la peau de daim et séchée. Le meulage à sec est suivi d'un soufflage à l'air comprimé, essuyage avec des chiffons et du marli imbibé d'une solution de dépoussiérage.

La surface ainsi préparée reçoit une ou plusieurs couches de peinture suivant les spécifications imposées.

L'achèvement d'une surface peinte prévoit le vernissage, le polissage et l'enjolivement.

Le vernissage communique au revêtement des propriétés de protection élevées et un poli spéculaire; le vernis est porté sur une surface peinte en une ou plusieurs couches.

Le polissage s'emploie pour obtenir une surface particulièrement lisse et brillante; il s'effectue à l'aide de disques de feutre ou de drap, de peau de mouton, etc., formant meule et enduits de pâtes ou de substances abrasives spéciales.

14—128

L'enjolivement consiste à exécuter des lignes décoratives, des dessins et des blasons.

Les procédés de peinture employés en construction mécanique sont variés, mais tous ils prévoient la dilution des colorants jusqu'à la viscosité imposée, suivie de l'exécution des couches minces et uniformes portées sur une surface sèche ou sur une couche de peinture déjà séchée.

La *peinture au pinceau* doit être réalisée par un opérateur très qualifié; par ailleurs, c'est un procédé très peu productif.

La *peinture par pulvérisation* (au pistolet) s'opère dans des cabines appropriées dotées d'appareils de ventilation puissants. L'outil est un pistolet dans lequel la pression de l'air atteint 3 à 6 at. La productivité de ce procédé est de 10 à 20 fois supérieure au précédent.

Dans la production en grande série et de masse (surtout dans le cas des pièces moyennes et petites d'une forme simple) ce procédé peut être automatisé.

Les grands objets d'une forme simple (navires, wagons, bennes de camion, etc.) sont traités par projection sans compression, la pulvérisation s'opérant sous l'effet de la pression hydraulique (30 à 50 atmosphères abondantes) qui agit sur le mélange versé dans un appareil spécial, le multiplicateur. La pression élevée refoule le fluide visqueux qui s'échappe du bec à grande vitesse pour être pulvérisé au contact de l'air atmosphérique qui lui oppose une résistance. Dans la projection sans compression on utilise surtout des gicleurs à turbulence qui assurent une bonne pulvérisation des vernis et des peintures.

La pulvérisation sans compression accroît la productivité du travail, permet d'économiser des vernis et des peintures et produit un brouillard relativement faible, diminuant ainsi la puissance requise des appareils de ventilation par rapport à la projection par l'air comprimé.

La *peinture par immersion* sert surtout pour l'exécution des revêtements anticorrosifs des pièces moyennes et petites d'une forme qui permet à la peinture de s'écouler sans se maintenir dans les creux. L'opération peut être manuelle ou mécanique, dans ce dernier cas elle est exécutée à la chaîne. A cet effet on emploie un convoyeur aérien qui assure le transfert des pièces rattachées à travers un bain de peinture; à mesure que la pièce se rapproche du bain, elle est abaissée jusqu'au niveau suffisant pour y être plongée, après quoi elle remonte progressivement pour laisser s'écouler dans le bain l'excédent de peinture.

Une installation pour la peinture par immersion mécanique s'effectuant à l'aide des convoyeurs aériens occupe 2 à 2,5 fois plus de surface que celle s'effectuant à l'aide d'un monorail à montée verticale, mais elle accroît nettement la productivité.

La *peinture par arrosage* s'emploie pour porter des revêtements de protection sur des pièces d'une configuration simple; elle est effectuée à la main sur une table avec un flexible lié à un réservoir, ou mécaniquement dans une chambre comportant un système de gicleurs.

La *peinture au tonneau* est usitée pour porter des revêtements en une couche, avec des colorants à séchage rapide, sur de petites pièces d'un type unique (surtout normalisées).

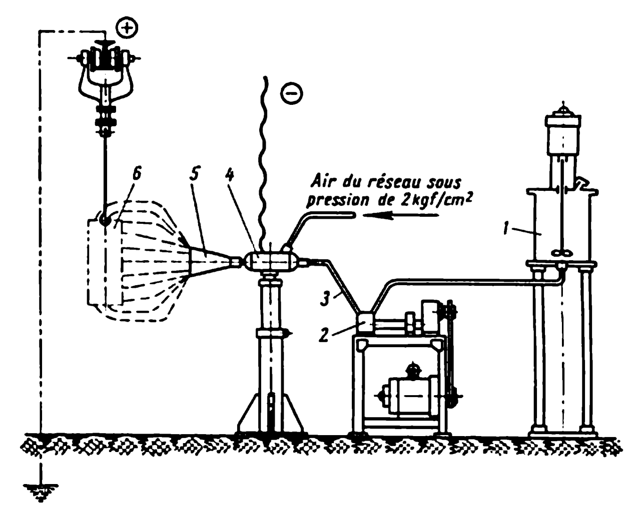


Fig. 121. Schématisation de l'exécution d'un revêtement à la peinture dans un champ électrique:

1 — réservoir; 2 — pompe; 3 — flexible; 4 — turbine; 5 — pulvérisateur; 6 — objet à traiter

Par rapport aux modes courants de revêtements la *peinture dans un champ électrique de haute fréquence* présente les avantages suivants (fig. 121):

1) diminution du débit de colorant de 30 à 75 %, les pertes ne dépassant pratiquement pas 1 %;

2) automatisation complète;

3) productivité élevée (vitesse de la chaîne de peinture jusqu'à 60 m/mn);

4) réduction des frais d'exploitation (ventilation, chauffage, nettoyage des cabines de peinture);

5) faible consommation d'énergie électrique;

6) très belle qualité et absence presque totale de rebut.

Il existe deux procédés de pulvérisation de la peinture, pneumatique et par centrifugation.

Pour la pulvérisation pneumatique, les pièces fixées à un convoyeur aérien ou à sol sont entraînées à travers la zone d'opération entourée d'un cadre de fils métalliques fins (électrodes produisant des décharges en couronnes) couplés au pôle négatif ; la pièce est couplée au pôle positif.

Un jet de peinture pulvérisée est projeté dans la zone opératoire par un pistolet fixé sous un angle de 15° par rapport à la chaîne. Lorsque les particules parviennent dans le champ électrique, elles se chargent et sont attirées à la pièce. Pour uniformiser la couche de peinture, la pièce est animée d'un faible mouvement de rotation (6 à 10 tr/mn).

Le champ électrique est produit par des générateurs à courant d'une tension de 40 000 à 140 000 V et d'une intensité de 0,2 à 7,5 mA. La haute tension s'obtient à l'aide d'un transformateur. La tension pulsatoire redressée à une alternance s'obtient à l'aide d'un redresseur au sélénium ou à vide poussé.

La distance entre les électrodes à décharge en couronne et la pièce varie de 250 à 300 mm, entre les électrodes et les parois de la cabine, de 450 à 600 mm.

Le procédé pneumatique est moins économique que la centrifugation ; sa mise en œuvre exige le réglage de l'air comprimé, le remplacement des cadres d'électrodes lorsque les pièces à peindre sont de types différents, un lavage fréquent des buses des pistolets, etc. ; on y recourt donc pour réaliser la peinture des ensembles d'une géométrie compliquée, lorsque le procédé permet d'obtenir de meilleurs résultats.

Le procédé de centrifugation consiste à pulvériser la peinture par des appareils munis de têtes sous forme de champignon. La peinture est amenée à la surface intérieure d'une tête à pulvériser animée d'un mouvement rotatif à la vitesse de 500 à 4000 tr/mn, qui la pulvérise par effet de centrifugation.

Les têtes à champignon se font amovibles, leur forme et leurs dimensions, établies expérimentalement, sont les plus variées. Près des bords, les champignons sont affûtés de manière que la pointe produisant la décharge en couronne ait une épaisseur de 0,2 à 0,4 mm.

Le champignon est placé à une distance de 250 mm de l'objet. Une tête de 150 mm de diamètre permet de peindre une surface de 500 mm de diamètre, alors qu'une tête de 300 mm de diamètre couvre de peinture une surface de 1000 mm de diamètre.

La peinture est refoulée par une pompe à engrenages sous une pression de 500 mm de la colonne d'eau.

La pulvérisation de la peinture par une tête à champignon rend possible la modification de la direction de la projection ; l'appareil est donc plus universel.

Le champignon d'un pulvérisateur se fait amovible; pour le lier au moteur, il est monté par sa queue sur un arbre (fig. 122). Le champignon est couplé à une source de courant. Son protecteur porte en plus un nœud en fil métallique qui assure le réglage de l'angle d'inclinaison du jet imposé. Le fil métallique reçoit une charge électrique de même signe que la peinture, et c'est pourquoi il la repousse.

Pour assurer un revêtement uniforme, le pulvérisateur est animé d'un mouvement vertical alternatif à la vitesse de 0,2 à 0,6 m/s. Si le champignon et la pièce ne se déplacent pas, la peinture se dépose sur la pièce en formant un anneau.

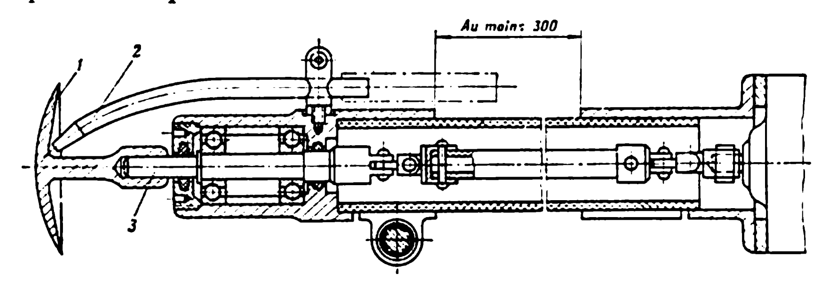


Fig. 122. Pulvérisateur à champignon à commande électrique:
1 — champignon du pulvérisateur; *2* — tube d'amenée; *3* — arbre du pulvérisateur

Le séchage des revêtements peut être naturel ou artificiel.

Le séchage naturel s'emploie essentiellement pour des peintures à séchage rapide (émaux nitrocellulosiques, etc.). Le séchage naturel des peintures à l'huile et des émaux dure longtemps.

Pour éliminer les vapeurs nocives des solvants, les pièces doivent être placées dans une étuve équipée d'appareils de ventilation.

Le séchage artificiel se fait à l'air chaud (par convection), par radiations, par chauffage par induction dans des étuves avec chargement continu (chaîne) ou périodique.

Le *séchage à l'air chaud* s'opère dans des étuves chauffées par la vapeur de 60 à 120° ou par le gaz de 160 à 220°. Il est rare qu'on utilise des étuves chauffées au pétrole, car leur chaudière échauffe jusqu'à une température élevée l'air ambiant à une distance importante d'elles. Parfois les étuves sont chauffées de 60 à 240° par le courant électrique; les éléments de chauffage peuvent être alors placés soit à l'intérieur de l'étuve (circulation naturelle), soit à l'extérieur (circulation artificielle).

Les étuves les plus usitées sont celles chauffées à la vapeur par des batteries de chauffage; dans ce cas l'action des calorifères est renforcée par les batteries.

Le *séchage par radiation* est assuré par un échauffement rapide de la surface peinte portée à 150 ou 180° par un rayonnement infrarouge émis par des lampes électriques à incandescence (250 à 1000 W) et dirigé sur la surface peinte par des projecteurs spéciaux. Pour ce mode de séchage on peut également employer des étuves dans lesquelles la pièce passe entre des panneaux parallèles chauffés de 350 à 700° par des chalumeaux à gaz.

Le séchage par radiation est beaucoup plus rapide que celui à l'air chaud (de 3 à 10 fois).

Le *séchage par induction* s'opère sur une chaîne qui se déplace à l'intérieur de solénoïdes spéciaux parcourus par le courant d'une fréquence de 250 à 800 p/s. La température d'échauffement varie de 200 à 300°. Ce mode opératoire nécessite une consommation importante d'énergie électrique. Le séchage artificiel réduit de 15 à 20 fois la durée de l'opération par rapport au séchage naturel.

Graissage de protection. Lorsque après la fabrication les pièces mécaniques finies ne sont pas acheminées directement vers l'assemblage, mais sont conservées ou transportées pendant un laps de temps assez long, on les recouvre d'une couche de graisse pour les préserver de la corrosion.

Les huiles et les graisses utilisées à cette fin doivent être exemptes d'additions mécaniques, d'eau et d'acides minéraux à l'état libre. Pour neutraliser les acides, on ajoute parfois à la graisse jusqu'à 0,02 % d'alcali libre ou lié. Pour rendre la graisse mieux adhérente on y ajoute du savon ou du colophane.

Les graisses de protection les plus usitées sont les huiles minérales (à broches, pour machines, pour cylindres) qui assurent une protection pendant la période qui ne dépasse pas 1 à 2 mois; la vaseline technique (55 % d'huile minérale, 30 % de pétrolatum de Bakou et 15 % de paraffine) assurant la protection pendant une longue période (de 6 à 8 mois); le graissage anticorrosif prévu pour les pièces en acier (37,5 % d'huile pour machines, 37,5 % d'huile pour cylindres, 5 % de colophane, 20 % de vaseline technique) assurant la conservation des pièces dans un magasin; la graisse pour fusils, pour canons, pour obus, etc.

La gamme d'application du graissage prévoit la préparation des surfaces et l'exécution de l'opération.

La meilleure préparation des pièces consiste à les laver dans des laveuses ou des machines à laver. Comme détergents on emploie des solutions chaudes (60 à 90°) de soude (2 à 2,5 %), de savon (1 à 2 %), d'émulsion d'arrosage neutre (10 %); une fois le traitement au détergent fini, les pièces sont lavées à l'eau pure ou successivement à l'huile minérale chaude (60 à 90°) et à la vaseline technique fondue (110 à 115°); dans ce dernier cas, l'eau est supprimée avec les restes du détergent.

Le séchage se fait: à la sciure de bois sèche, en essuyant avec des chiffons propres, à l'air chaud dans des étuves, au soufflage par l'air chaud comprimé; ce dernier procédé est le plus productif.

L'application d'une graisse protectrice s'opère par immersion dans un bain de graisse portée à 60 ou 70°. Le graissage de grosses pièces et des mécanismes assemblés se fait soit au pinceau (graisses liquides), soit à l'étoupe douce (graisses consistantes); la préparation de la surface consiste alors à l'essuyer avec des chiffons imbibés de solvants dégraisseurs (essence, éther de pétrole) ou de l'alcool, et à la sécher à l'air chaud comprimé. L'application de la graisse au pinceau et à l'étoupe est un procédé peu productif. Une méthode beaucoup plus productive est celle de la pulvérisation des graisses liquides. C'est un procédé très efficace qui permet de graisser les pièces même aux endroits inaccessibles à d'autres procédés.

Correction des ébauches rebutées en cours de fabrication

Pour faire économie de métal et valoriser le travail dépensé, il faut corriger au possible le rebut éventuel produit en cours de fabrication. La correction des pièces rebutées acquiert une importance particulière en construction mécanique lourde, car la fabrication de grosses pièces implique des frais importants de main d'œuvre et de matériaux.

Les modes de correction des pièces brutes sont les suivants.

La courbure des pièces lourdes obtenues par forgeage libre est corrigée par dressage à chaud; les criques transversales et les repliures superficielles sont éliminées par burinage en cours de forgeage; une dureté trop forte ou trop faible est corrigée par un traitement thermique réitéré; pour pallier à la surchauffe, on recourt au recuit de normalisation.

La courbure des ébauches matricées est corrigée par dressage à froid dans une matrice sur une presse ou à la main avec ajustage ultérieur suivant un gabarit ou un vérificateur spécial; les veines sombres, les repliures, les bavures ainsi que d'autres défauts superficiels sont éliminés au burin avec meulage ultérieur; la profondeur du burinage et du meulage ne doit pas être supérieure à la moitié de la surépaisseur d'usinage; les défournis locaux peu importants peuvent être comblés par soudage, de même que les empreintes; les ébauches à métal en excès (matriçage insuffisant) sont triées pour subir l'usinage jusqu'aux cotes normales; une pièce gauchie ne peut être corrigée que par un nouveau matriçage dans une estampe à verrouillage, un bon guidage du mouton sur les glissières du marteau étant de rigueur; un gauchissement insignifiant (inférieur

à la moitié de la surépaisseur) est corrigé par meulage de la surface de départ (planage de la surface) ; une dureté excessive ou insuffisante et une ténacité excessive sont éliminées par un traitement thermique répété ; la surchauffe est corrigée par un recuit de normalisation.

La brûlure, la stratification, les tapures de trempe, une face craquelée rendent la pièce inacceptable.

Pour corriger les ébauches défectueuses venues brutes de fonderie on fait appel aux procédés suivants.

Les bavures (ailettes d'une forme quelconque, saillies et autres bossages sur une pièce coulée, formés au droit du joint des châssis ou dans les jeux entre les parties du moule) sont éliminées par burinage pneumatique et par meulage.

Le gauchissement ou la modification de la géométrie et des dimensions d'une pièce coulée sous l'effet du retrait est corrigé par dressage au marteau-pilon, à la presse ou à la main en portant des coups de marteau, ou par maintien sous charge dans un four à la température de 750°.

Les gouttes froides, sorte de petites billes métalliques qui se sont solidifiées indépendamment de la pièce dans des retassures ouvertes ou fermées, sont corrigées par soudage au gaz ou à l'arc électrique après nettoyage de la retassure ; si les gouttes sont inférieures à 20 mm, on les élimine par perçage ; le trou est ensuite fileté et fermé par un bouchon enduit de verre soluble ; les bouchons doivent être exécutés en même métal que le moulage ; les bouchons prévus pour des pièces en métaux ferreux peuvent être également en cuivre rouge ; une fois vissé, le bouchon subit le matage, alors que sa partie saillante est burinée et limée ou meulée.

Les bosses sur les surfaces des pièces coulées, formées d'un métal comportant des inclusions de sable ou de scories, sont chutées par burinage suivi de meulage ou d'usinage sur machine-outil.

Le non-venu dû au remplissage insuffisant du moule au moment de la coulée peut être corrigé parfois par une coulée supplémentaire ou par acérage.

Les endroits durs qui ne se prêtent pas à l'usinage sont éliminés par traitement thermique, notamment, par le recuit à la température de 850 à 950° ; les surfaces à traiter sont couvertes d'une couche de battitures ; le recuit est suivi d'un refroidissement lent à la vitesse de 120 à 180°/h.

La vitrification est une surface rugueuse d'une pièce coulée due à la fusion des sables de moulage avec le métal ; elle est enlevée par burinage et meulage.

Les soufflures, les ségrégations, les retassures, les cavités formées par du sable ou des scories sont comblées par soudure au gaz ou à l'arc électrique, par pose des bouchons lorsque le diamètre

des cavités ne dépasse pas 20 mm, par métallisation par projection d'une cavité préalablement régularisée par perçage ou burinage. La métallisation par projection s'emploie pour combler des cavités d'un diamètre inférieur à 12 mm après la régularisation et lorsque la profondeur de la cavité ne dépasse pas la moitié de sa dimension transversale. Pour régulariser les trous il est recommandé de pratiquer dans leurs parois latérales des logements en forme de queue d'aronde; la métallisation des pièces en métaux non ferreux venues brutes de fonderie et des surfaces des pièces coulées en fonte se fait au fil de zinc d'une nuance quelconque. Pour augmenter la densité du dépôt de zinc, il faut le mouiller deux ou trois fois à l'eau, directement après la métallisation, au fur et à mesure qu'il sèche. Les surfaces à usiner des pièces en fonte venues brutes de fonderie sont métallisées au fil d'acier à faible teneur en carbone. Pour combler les cavités par métallisation, on utilise un gabarit poli ou chromé comportant un trou de 3 à 5 mm plus grand que les dimensions de la cavité; le gabarit est fixé à 4 ou 5 mm de la surface. La bosse qui se forme alors est burinée à partir du centre vers les bords, puis l'endroit traité est usiné par meulage.

La spongiosité et la porosité sont éliminées par soudage au gaz ou à l'arc électrique, par métallisation par projection, par imbibition, ou par matage. Les moulages spongieux qui aux essais par immersion témoignent d'une fuite peuvent être corrigés par imbibition du secteur défectueux par un oxyde de métal hydraté ou autre, ou par une matière résineuse introduite spécialement dans les cavités. Un oxyde hydraté s'obtient par corrosion artificielle réalisée en remplissant d'eau l'endroit défectueux. Si le suintement est négligeable les résultats obtenus en quelques heures d'application de ce procédé sont tout à fait suffisants.

Les moulages complexes en métaux ferreux sont corrigés par imbibition d'une solution aqueuse de 10 % de verre soluble ou de 4,5 % de chlorure d'ammonium, qui provoquent une corrosion énergique. On utilise également dans ce but une solution du chlorure ferrique avec du minium de fer en suspension. L'imbibition est suivie d'un séchage de 24 heures au moins. Les moulages en bronze ou en aluminium sont imbibés d'une solution de 40 % de bakélite dans l'alcool.

Pour obtenir un effet décoratif, les défauts de surface sont corrigés par des mastics spéciaux. L'endroit défectueux soigneusement nettoyé du sable est rempli de mastic, dilué dans l'eau jusqu'à l'état d'une colle épaisse, qui est fortement tassé, puis aplani. Le mastic sèche pendant 24 heures, après quoi il est poli soit avec un morceau de pierre ponce, soit avec un morceau de coke; l'endroit réparé devient alors invisible. Le mastic composé de 2 fractions de feldspath, d'une fraction de verre finement broyé et de verre

soluble est particulièrement résistant. Cette masse doit avoir la consistance d'une crème. Ce mastic se solidifie en 3 ou 4 jours.

Le matage s'emploie pour corriger les moulages à faible porosité révélée par des essais par immersion, prévus pour travailler à des pressions allant jusqu'à 3 at. Les petites cavités et les fuites au droit des supports de noyaux sont également éliminées par matage.

Les reprises (fentes et creux dans le corps d'une pièce moulée résultant de la rencontre de deux courants qui se sont solidifiés avant de se fusionner), les rides (empreintes peu profondes et étroites dans le corps d'une pièce couvertes d'une couche de métal séparée du corps de la pièce par du sable) et les criques sont corrigées par soudage au gaz ou à l'arc électrique.

Les défauts mécaniques sont corrigés par soudage à l'arc ou au gaz des parties brisées; dans certains cas on peut effectuer le soudage par métal liquide.

Les dimensions excessives des moulages sont corrigées par dégrossissage préalable.

Si la microstructure du métal ne correspond pas au cahier des charges, on y remédie par un traitement thermique correspondant; il arrive que ce dernier permette également de corriger certains écarts des propriétés physiques et mécaniques.

Une composition chimique défectueuse ne se prête pas à la correction et les ébauches doivent alors être rebutées définitivement.

Les défauts révélés en usinage sont corrigés de la manière suivante.

La courbure est éliminée par dressage à froid. Le gauchissement éventuel par dégrossissage doit être prévu et corrigé par l'exécution ultérieure de la gamme d'usinage lors de la finition; il faut donc prévoir à cet effet une surépaisseur suffisante. Dans des cas particuliers, on peut corriger le gauchissement par dressage à froid ou avec chauffe.

Les défauts des pièces forgées et coulées révélés en usinage sont corrigés par les mêmes procédés que dans le cas des pièces venues brutes de fonderie ou de forge, suivis d'achèvement des endroits traités.

Les écarts dimensionnels supérieurs aux tolérances imposées, maximales pour les surfaces extérieures et minimales pour les surfaces intérieures, sont corrigés par un usinage supplémentaire.

Les écarts dimensionnels supérieurs aux tolérances imposées, minimales pour les surfaces extérieures et maximales pour les surfaces intérieures, peuvent être corrigés souvent par la mise à la cote au moyen de la chromisation électrolytique. Les surfaces extérieures peuvent être également mises à la cote par métallisation par pulvérisation avec le traitement préalable correspondant de la surface traitée et l'usinage ultérieur du dépôt jusqu'à la cote imposée.

Pour corriger les dimensions des trous, on peut poser à force des bagues déjà percées ou fraisées et alésées ensuite.

En construction mécanique lourde on recourt largement à l'ajustage unitaire. C'est pourquoi il est d'usage de lancer d'abord la fabrication des pièces femelles; il est possible alors, lorsqu'on enregistre des écarts par rapport à la cotation imposée par le dessin, d'usiner les pièces mâles conjuguées compte tenu des cotes respectives (ajustage unitaire en usinage sur des machines-outils). Parfois il est plus avantageux, pourtant, de commencer la fabrication par des pièces mâles; il en est ainsi notamment dans le cas d'un vilebrequin lourd; les trous dans les coussinets des paliers, prévus pour recevoir les tourillons, sont plus faciles à exécuter à la demande des tourillons dont les dimensions sont déjà établies. D'autre part, les dimensions des surfaces d'ajustement extérieures des coussinets doivent être établies à la demande des surfaces conjuguées d'un bâti déjà usiné.

Dans le cas de grosses pièces, les écarts dimensionnels entre les axes des trous ou les écarts des cotes de position, ainsi que les écarts de coaxilité des trous peuvent être corrigés souvent en posant à force des bagues alésées ultérieurement.

B. Pièces mécaniques en cermet

Les pièces mécaniques en cermet s'obtiennent par compression des mélanges de poudres métalliques dans des matrices en acier sous une pression de 1000 à 6000 kg/cm^2 avec frittage ultérieur des pièces comprimées à une température inférieure à celle de la fusion du composant de base de l'alliage (compression à froid). La compression et le frittage peuvent s'effectuer simultanément (compression à chaud).

Les modes de fabrication des pièces en cermet rendent possible l'obtention des matériaux réfractaires à partir de métaux immiscibles à l'état fondu (fer-plomb, tungstène-cuivre) et à partir de métaux et de matériaux non métalliques (cuivre-graphite, etc.). Pour le moment, il n'existe pas d'autres procédés pour obtenir de tels matériaux.

Pour préparer la poudre métallique on emploie généralement des copeaux d'usinage; les petits copeaux sont utilisés directement, alors que les gros sont d'abord transformés.

Le broyage s'opère dans des moulins à boulets et sur des meules verticales (grains de 0,04 à 0,10 mm) ou dans des moulins tourbillonnaires. Un tel moulin est constitué par une chambre dans laquelle deux hélices tournent à grande vitesse (3000 tr/mn) en sens opposés engendrant des courants tourbillonnaires; ces courants projettent les unes contre les autres les particules de métal

fractionné au préalable; la grandeur des grains ainsi obtenus varie de 0,02 à 0,4 mm; les poudres métalliques peuvent être obtenues également par pulvérisation à l'air et à la vapeur des métaux facilement fusibles et des alliages à l'état liquide, ainsi que par d'autres procédés.

Les poudres ainsi obtenues sont séparées en diverses fractions par tamisage soit à l'aide des tamis métalliques, soit à l'aide des tamis en soie, ainsi que par séparation à l'air. Le mélange des poudres s'effectue dans des tambours à axe de rotation excentrique ou dans des moulins à boulets. La compression est réalisée dans des matrices sur des presses hydrauliques ou à bielle et excentrique.

Le frittage s'opère dans des fours à gaz ou électriques à une température inférieure à celle de la fusion du composant de base; son but est d'améliorer les propriétés mécaniques des pièces. La durée de frittage varie de 15 minutes à 24 heures en fonction des dimensions des pièces et l'aptitude au frittage du matériau.

Le frittage augmente nettement la résistance des pièces. Parfois, pour obtenir des propriétés imposées, on effectue après le frittage un usinage ou un traitement thermique supplémentaire des pièces.

Les pièces ainsi fabriquées reçoivent des formes et des dimensions qui rendent inutile tout usinage ou qui le réduisent aux petites opérations d'achèvement (perçage des trous ou exécution des filets, par exemple).

On obtient ainsi, entre autres, des coussinets en cermet poreux pour paliers, des disques à friction, des filtres, des garnitures, etc.

La mise à la cote précise des pièces en cermet s'effectue par calibrage (compression à froid) dans des matrices.

Après la compression à froid, les pièces subissent parfois le recuit.

La gamme de fabrication des pièces en cermet permet d'assurer une précision élevée; ainsi, la précision des roulements d'un diamètre ne dépassant pas 50 mm est de 0,03 mm pour le diamètre, de 0,13 mm pour l'épaisseur, et de 0,08 mm pour l'excentricité.

L'usinage des cermets non poreux s'effectue d'une manière analogue à celui des métaux et des alliages usuels. Les cermets poreux sont usinés avec des outils en acier rapide ou des outils à plaquettes rapportées en carbures durs, sans arrosage, pour éviter la pénétration du liquide d'arrosage dans les pores du matériau. Pour l'ébauchage, l'angle d'arête de coupe latéral est choisi entre 5 et 8°; pour la finition, on emploie des outils pelles, les régimes étant les suivants: $v = 18$ à 25 m/mn; $a = 0,3$ à 0,8 mm/tr; $t = 0,8$ mm.

Dans le travail des cermets poreux, les meules ne s'emploient pas pour éviter la pénétration des grains d'abrasif dans les pores.

La compression à chaud n'est appliquée généralement que pour la fabrication de grosses pièces (d'un poids atteignant 100 kg) ou de plaques minces, disques et autres pièces susceptibles de gauchissement lors du frittage.

Pour prévenir le gauchissement et la stratification des disques de friction en cermet, le frittage se fait sous faible pression et à de faibles vitesses de compression.

C. Pièces mécaniques en matières plastiques

La forme imposée des pièces mécaniques en matières plastiques peut être obtenue par compression, par moulage par compression et par injection, par formage des tôles stratifiées thermodurcissables, par estampage et cambrage.

La fabrication par compression des pièces de forme s'opère dans des matrices fixées aux presses hydrauliques ou mécaniques.

La compression des poudres s'opère à la pression spécifique de 70 à 700 kg/cm^2, alors que celle des matériaux stratifiés et fibreux, des textolites et de la sciure de bois, de 250 à 1000 kg/cm^2, en fonction de l'aptitude au fluage du matériau de départ, de la forme de la pièce et de la constructiom de la matrice.

La compression se produit à la température de 100 à 200°, suivant la matière d'œuvre, sa préparation préalable, la durée du maintien, choisie entre 0,8 et 1,5 mn par 1 mm d'épaisseur maximale de la pièce; la durée du maintien diminue avec l'élévation de la température. Lors de la fabrication des tôles et des plaques à partir des tissus imprégnés de résine, du papier ou du bois de placage, la durée du maintien est de 4 à 7 mn par 1 mm d'épaisseur.

Lors du moulage par compression, la matière à mouler est échauffée dans une chambre jusqu'à un état semi-liquide, après quoi elle est poussée à travers un ou plusieurs canaux dans le moule. Ce mode de fabrication fournit des pièces d'une forme complexe, à carcasse compliquée, ou des pièces munies de trous profonds de petit diamètre. La pression spécifique varie de 500 à 2000 kg/cm^2.

Le moulage par injection s'effectue sur des machines automatiques. La matière est refoulée automatiquement à partir d'une trémie dans un cylindre où elle est ramollie, après quoi un plongeur la pousse à travers une tuyère et des canaux de coulée dans l'empreinte du moule. Après le refroidissement à l'eau qui passe par les canaux du moule, la pièce en est chassée par des extracteurs.

L'extrusion, c'est-à-dire le filage continu ou cyclique des profilés, permet d'obtenir des produits à section uniforme (barres, tubes, etc.). La matière est refoulée à partir d'une trémie dans un cylindre où elle est ramollie sous l'action de la chaleur transmise par la chemise du cylindre; puis le piston ou la vis sans fin la refoule

vers la culasse du cylindre où elle est extrudée à travers la filière (buse) et refroidie à l'air ou à l'eau à la sortie.

Pour la fabrication des ébauches (tôles, plaques, billettes, etc.) et des pièces d'une forme simple, on utilise le procédé de moulage sans pression dans des moules en alliage d'aluminium et de zinc ou en bois.

Le formage des matières stratifiées s'opère dans des autoclaves où les matrices transmettent à la pièce hermétiquement couverte par un sac de caoutchouc la chaleur et la pression extérieure du milieu. La pression de 3 à 6 kg/cm^2, nécessaire pour le formage, est produite par refoulement de l'eau à la température ambiante. La pression peut être élevée jusqu'à la limite admise par la résistance de l'autoclave. L'échauffement de la matière d'œuvre est assuré par des résistances électriques incorporées dans le sac élastique ou dans la matrice. Les autoclaves peuvent atteindre des dizaines de mètres de longueur et avoir un diamètre de 3 à 5 m ; ils peuvent donc servir pour la fabrication de grosses pièces.

Le mode de fabrication de grosses pièces dans le vide est analogue au formage dans des autoclaves, à cette différence près que l'on crée le vide dans le sac caoutchouté où l'on place la matrice avec la matière d'œuvre.

L'estampage des matières plastiques se fait par découpage et emboutissage. Le découpage s'effectue avec un poinçon et une matrice. La matière peut être travaillée à froid (découpage des tôles jusqu'à 1,5 mm d'épaisseur) ou échauffée jusqu'à l'état plastique. Pour emboutir une pièce en fibre, elle est trempée d'abord dans l'eau à la température ambiante (1,5 à 2 h par 1 mm d'épaisseur), puis placée sur un outil d'emboutissage confectionné généralement d'un contre-plaqué et comportant un serre-flan. Une fois le serre-flan dégagé et la gaufre coupée, l'ébauche avec le poinçon est placée dans une étuve où elle est maintenue pendant 12 h à la température de 65 à 70° ; ensuite la pièce estampée est placée sous une presse pour la dégager du poinçon et montée sur un gabarit dans le but de prévenir son gauchissement et lui assurer l'humidité imposée. L'emboutissage s'opère généralement sur des presses hydrauliques.

Le cambrage est un procédé de formage de la fibre, des matières plastiques stratifiées en bois et autres tôles plastiques. Pour cambrer la fibre, son humidité doit atteindre 10 à 12 % et l'angle de cambrage doit dépasser de 10 à 15° l'angle requis. Les tôles stratifiées en matières plastiques (bois) d'une épaisseur de 1 à 2,5 mm avant le cambrage sont maintenues 2 à 3,5 h dans de l'eau chauffée à 95 ou 98°.

Pour augmenter la résistance et la tenue à l'humidité, ainsi que pour assurer la stabilisation des dimensions et de la géométrie des pièces obtenues par compression on recourt au traitement thermique

dans l'huile échauffée progressivement jusqu'à 120° en 1 ou 1,5 h; la durée du maintien est établie à raison de 15 à 20 mn par 1 mm d'épaisseur; ensuite, l'huile est progressivement refroidie jusqu'à 40 ou 50° et la pièce dégagée.

La précision élevée de tous ces modes de fabrication des pièces mécaniques en matières plastiques rend inutile leur usinage ultérieur.

Il arrive que les pièces en matières plastiques de construction subissent l'usinage.

Le tranchage des tôles et des barres en matières plastiques de construction se fait par sciage mécanique ou manuel. Le sciage mécanique est effectué avec des scies à ruban et circulaires (analogues à celles employées pour le bois) à la vitesse de coupe entre 15 et 20 m/s; des scies circulaires à denture fine s'emploient pour le sciage rectiligne des tôles à la vitesse de 50 à 65 m/s. Le débit manuel du verre organique et du textolite s'opère à l'aide des porte-scies avec une lame à denture fine (pas inférieur à 1 mm). Pour le débitage de la balinite on peut employer également des scies à archet à denture fine. Lors du débitage des matières plastiques de construction, l'affûtage des arêtes de coupe acquiert une importance particulière, car dans le cas d'une denture émoussée la chaleur dégagée par le sciage exerce une action nocive sur la matière au voisinage de la voie.

Le tournage est appliqué surtout au travail du textolite, plus rarement du verre organique. L'usinage se fait avec des outils en acier allié, rapide ou au carbone, ainsi qu'avec des outils à plaquettes rapportées en carbures durs. Les angles d'affûtage doivent être: $\gamma = 15$ à $20°$; $\alpha = 10$ à $12°$.

Les avances ne doivent pas dépasser 0,3 mm/tr; une avance plus grande conduit à l'arrachement des couches au moment où l'outil se dégage. Les vitesses de coupe avec des outils en acier rapide s'élèvent à 300 m/mn, alors que pour les outils à plaquettes rapportées en carbures durs, à 800 m/mn.

Le perçage des trous dans les matières plastiques stratifiées doit se faire avec des forets en acier rapide, car la productivité des outils en acier au carbone est trop faible, alors que les outils à plaquettes rapportées en carbures durs produisent des brûlures à la surface des trous.

Pour le perçage des trous d'un diamètre inférieur à 25 mm dans le textolite il est recommandé d'utiliser les forets conçus par le professeur A. Issaiev; pour les trous d'un diamètre compris entre 20 et 40 mm, les outils indiqués sont les forets normalisés à double affûtage. Pour les trous d'un diamètre supérieur à 40 mm perçés dans des tôles d'une épaisseur supérieure à 8 mm, on emploie des outils à aléser.

Les avances de perçage varient de 0,1 à 0,3 mm/tr. Si l'avance est plus importante, les couches de la matière stratifiée se détachent à la sortie ou à l'entrée du trou ; aux avances inférieures à 0,05 mm/tr, les couches de la matière s'effilochent. Pour prévenir les brûlures à la surface des trous, la vitesse de coupe doit être comprise entre 40 et 60 tr/mn.

Pour le perçage de l'hetinax on emploie des forets en acier rapide à angle de pointe $\varphi = 100$ à 110°. Les trous d'un diamètre inférieur à 6 mm peuvent être exécutés avec des forets à langue d'aspic. Les forets à plaquettes rapportées en carbures durs sont très avantageux pour le travail de cette matière. Les trous d'un diamètre supérieur à 40 mm sont percés avec des outils à aléser. Le régime de coupe pour le perçage de l'hetinax est défini à peu près par les mêmes facteurs que dans le cas du travail du textolite.

Lors de l'usinage de la balinite et du presspahn on utilise les mêmes forets que pour le textolite. Les vitesses de coupe recommandées ne doivent pas dépasser 50 m/mn et les avances doivent se situer essentiellement entre 0,07 et 0,13 mm/tr, mais ne pas dépasser 0,2 mm/tr.

L'angle de pointe d'un foret hélicoïdal prévu pour le perçage des verres organiques doit être $\varphi = 70°$; le perçage des tôles d'une épaisseur inférieure à 5 mm peut se faire avec des forets à langue d'aspic, l'angle de pointe étant également $\varphi = 70°$. Pour percer des trous d'un diamètre supérieur à 40 mm dans des tôles d'une épaisseur allant jusqu'à 30 mm on emploie l'outil à aléser. Le perçage du verre organique se fait à une vitesse de coupe comprise entre 45 et 50 m/mn et une avance variant de 0,06 à 0,1 mm/tr ; la tenue de l'outil à ces régimes est de 40 à 60 mn.

Il importe de noter que l'exécution des trous dans les matières plastiques ne peut être menée à bonne fin qu'à la condition d'une fixation rigide de la pièce usinée et d'une perpendicularité parfaite de la surface du trou d'entrée par rapport à l'axe de rotation du foret. Le perçage doit être effectué sur une cale soigneusement rabotée en bois d'une espèce douce. L'opération est menée généralement sans arrosage. En définissant la précision d'usinage, il faut tenir compte du retrait qui diminue le trou percé de 0,01 à 0,05 mm par rapport au diamètre du foret.

Le fraisage des matières plastiques peut s'opérer avec des fraises cylindriques hélicoïdales, des fraises à rainurer et des fraises disque à une dent.

La vitesse de coupe lors du fraisage de la balinite est choisie à partir de 50 m/mn en fonction des propriétés coupantes du matériau de l'outil. Si la vitesse est plus faible, on observe l'arrachement des fibres de la matière usinée. On adopte généralement une vitesse de coupe comprise entre 100 à 200 m/mn et une avance de 0,1 à

0,2 mm/dent. L'usinage s'effectue en avalant, le sens de l'avance correspondant à la rotation de l'outil. Si le travail est exécuté avec des fraises en acier rapide, la vitesse de coupe est choisie entre 300 et 675 m/mn. Le meilleur usinage du presspahn est obtenu à des vitesses de coupe supérieures à 150 m/mn et des avances de 0,02 à 0,04 mm/dent. Le fraisage de la textolite se fait à des vitesses de coupe de 500 à 1500 m/mn, suivant la profondeur de coupe et l'avance choisie entre 0,15 et 0,5 mm/dent.

L'usinage du verre organique avec des fraises à denture hélicoïdale se fait à une vitesse allant jusqu'à 200 m/mn et une avance de 0,03 mm/dent; si la vitesse de coupe est supérieure à 200 m/mn, la qualité de la surface engendrée dégrade sous l'effet de la chaleur dégagée par la coupe. La tenue des fraises en acier au carbone à ce régime est généralement supérieure à 100 mn. Pour l'usinage du verre organique avec une fraise à rainurer trois tailles, la vitesse de coupe est choisie de 200 à 400 m/mn et l'avance, de 0,03 à 0,05 mm/dent.

Pour l'usinage du verre organique on recourt généralement au polissage et à la rectification. La rectification s'effectue avec une toile émeri extra-fine n° 325 pour la rectification préalable, et n° 400 et supérieurs pour la finition. L'opération est menée avec arrosage abondant par l'eau, le polissoir se déplaçant suivant des trajectoires courbes. Il est rare que la rectification se fait pour toute la surface; on l'emploie surtout pour faire disparaître les stries unitaires et les aires d'un mauvais état de surface, les traces laissées par la rectification étant ensuite éliminées par polissage à la pâte.

Le polissage du verre organique se fait avec une meule douce enduite d'une pâte spéciale; la vitesse périphérique de la meule est choisie entre 500 et 600 m/mn. La finition est réalisée avec des meules de drap à la vitesse périphérique de 1000 à 1100 m/mn, ou de daim, à la vitesse de 900 à 1000 m/mn. Lorsque les spécifications du poli sont particulièrement rigoureuses, on effectue le brillantage avec des meules de daim à la vitesse de 2500 à 3000 m/mn ou avec des meules de flanelle de coton à la vitesse de 1750 à 2100 m/mn.

§ 2. Caractéristique des modes opératoires d'assemblage

Assemblage par interchangeabilité totale et de groupe, par réglage, par ajustage; travaux d'ajustage et leur mécanisation.

Exécution des assemblages fixes démontables; exécution, mécanisation et vérification des assemblages par éléments filetés, clavettés, cannelés et goujonnés.

Modes d'exécution des assemblages fixes permanents; calculs technologiques et procédés d'exécution des assemblages forcés, réalisés sous pression, par action thermique sur les pièces conjuguées, par agrafage; assemblages exécutés par laminage, rivetage, soudage, brasage, collage, estampage à froid. Montage des assemblages mobiles.

Particularités de l'assemblage des pièces en matières plastiques.

Les modes d'assemblage mis en œuvre en construction mécanique sont fondés soit sur le principe de l'interchangeabilité, soit sur celui de l'ajustage unitaire des pièces conjuguées.

L'interchangeabilité présente les avantages suivants: a) assemblage simple réduit seulement au montage des pièces et des ensembles conjugués sans nécessiter aucun travail supplémentaire et donc sans augmenter la quantité de travail ni rendre la durée de l'opération plus longue; b) établissement éventuel d'une chaîne d'assemblage; c) réalisation éventuelle de la coopération de la production; d) simplification de l'approvisionnement en pièces de rechange et de l'entretien des machines en exploitation.

Ces avantages du procédé considéré ont conditionné sa large application dans la fabrication en grande et moyenne série.

Lorsque les tolérances sur les cotes des pièces conjuguées, établies en partant des considérations du fonctionnement, sont égales ou supérieures aux tolérances de fabrication sur ces mêmes cotes, l'assemblage autorise l'application du *principe d'interchangeabilité totale*. Dans le cas où les tolérances de fonctionnement sont inférieures à celles de fabrication, on risque d'obtenir des assemblages qui ne peuvent pas satisfaire aux spécifications; pour assurer alors l'aptitude des assemblages au fonctionnement, on est obligé d'introduire des travaux supplémentaires et compromettre par là le principe d'interchangeabilité. A titre d'exemple on peut citer l'assemblage par goupilles avec ajustement de la pièce femelle suivant la portée conique de l'arbre, lorsqu'il faut pratiquer simultanément dans les deux pièces conjuguées un perçage et un alésage du trou prévu pour recevoir la goupille; ou le rodage direct des soupapes sur leur siège dans les moteurs à combustion interne.

Le fonctionnement de la chaîne d'assemblage ne sera pas compromis si ces opérations s'effectuent au cours de l'usinage des pièces accouplées avant d'être acheminées vers la chaîne.

Dans le cas où les tolérances de fonctionnement sont inférieures à celles de fabrication, il est avantageux de remplacer les travaux du genre ajustage, inadmissibles dans les conditions d'un assemblage à la chaîne, par le *principe d'interchangeabilité de groupe*. Ce procédé consiste à réaliser les tolérances imposées par le fonctionnement non pas en respectant les cotes limitées par le cadre étroit des tolérances, mais par une sélection des pièces femelles et mâles fabriquées avec des tolérances accrues; dans ces conditions, l'assemblage peut être réalisé par: a) triage direct; b) triage préalable des pièces par groupes; c) combinaison du triage des pièces par groupes et du triage direct.

Lorsque l'opérateur procède par triage direct, il choisit parmi les pièces qui lui sont fournies celles dont l'ajustement établi au toucher ou à la jauge d'épaisseur correspond à la valeur imposée.

Parmi les inconvénients de cette méthode il y a: a) l'impossibilité d'établir une chaîne par suite des temps très variés nécessaires pour le triage; b) dépendance de la qualité d'ajustement de la dextérité et de l'expérience de l'opérateur.

Le triage préalable par groupes prévoit la division du champ de tolérances des pièces conjuguées en plusieurs parties égales; les pièces sont triées suivant le nombre de groupes qui correspond au nombre de parties du champ de tolérances, de façon que chaque groupe réunisse les pièces mâles et femelles appartenant à ce groupe; le premier groupe comprend alors les pièces mâles et femelles aux cotes limites maximales, alors que le dernier, les pièces mâles et femelles aux cotes limites minimales.

En pratique, le principe d'interchangeabilité de groupe est appliqué de la façon suivante: 1) choisir en fonction des conditions de fabrication les tolérances sur les cotes conjuguées, c'est-à-dire les tolérances de fabrication; 2) calculer la tolérance d'ajustement qui pourrait correspondre aux tolérances de fabrication imposées; 3) définir le nombre de groupes de triage des pièces; 4) déterminer les tolérances sur les pièces mâles et femelles séparément pour chaque groupe. On sait que la tolérance d'ajustement δ_s est calculée d'après la formule

$$\delta_s = \delta_a + \delta_b.$$

Le nombre de groupes n est défini comme le quotient des tolérances des ajustements

$$n = \frac{\delta_{a_m} + \delta_{b_m}}{\delta_{a_k} + \delta_{b_k}},$$

où δ_{a_m} et δ_{b_m} sont les tolérances de fabrication sur les cotes conjuguées;

δ_{a_k} et δ_{b_k}, les tolérances de fonctionnement sur ces mêmes cotes.

Les tolérances sur les cotes de chaque groupe sont calculées approximativement en divisant les tolérances de fabrication par le nombre de groupes.

Le triage des pièces par groupes s'effectue sur des machines spéciales. Lorsque l'assemblage par sélection ne faisait que ses premiers pas, on utilisait des tampons (fig. 123,*a*) et des calibres (fig. 123,*b*) étagés.

Les pièces de chaque groupe portent des marques respectives (A, B, C) et sont acheminées vers l'assemblage dans des caisses spécialement affectées à chaque groupe.

La combinaison du triage des pièces par groupes avec le triage direct consiste à sélectionner les pièces conjuguées au sein d'un même groupe, assurant ainsi un meilleur ajustement. Ce principe s'emploie notamment pour assembler les roulements de précision et dans certains autres cas.

Le nombre de pièces dans les différents groupes n'est pas le même, comme il ressort de l'étude des courbes de dispersion des cotes des pièces usinées. Pour les pièces mâles et femelles les courbes de dispersion ne sont pas non plus les mêmes. Un certain nombre de pièces est donc inutilisable, ce qui entraîne l'augmentation de la production inachevée. Pour y pallier il faut utiliser une méthode analogue à celle du fichier appliquée au travail unitaire. Dans ce cas, les groupes sont constitués de pièces dont les limites étroites des tolérances sont difficiles à observer dans les conditions de fabrication; dans la plupart des cas ce sont des pièces femelles; le nombre des pièces contenues dans le groupe considéré et défini par le triage détermine le nombre respectif des pièces accouplées à fabriquer dans les limites de la tolérance partielle du groupe. Ce procédé est appliqué en construction mécanique à l'étranger.

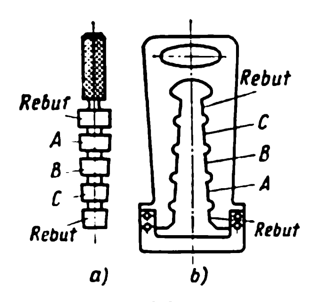


Fig. 123. Calibres étagés pour le triage des pièces par groupes

Le principe de l'*assemblage par réglage* consiste à établir les tolérances de fabrication sur les cotes des pièces faisant partie d'un ensemble, alors que l'ajustement imposé est réalisé par l'introduction d'un terme supplémentaire dans la série dimensionnelle. La figure 124 donne un exemple d'assemblage par réglage soit à l'aide d'un triage ou ajustage unitaire de l'anneau A, soit à l'aide d'un déplacement de la bague B. En guise d'entretoise on peut faire usage de rondelles de précision ou de jeux de joints, de coins, de bagues, de vis de réglage et d'autres dispositifs. Ce mode d'assemblage présente l'avantage de permettre l'exécution, au sein de l'ensemble considéré, de pièces largement tolérancées, ce qui simplifie l'usinage et réduit la quantité de travail, simplifie l'assemblage tout en assurant une précision élevée, rend possible le réglage non seulement en cours de montage, mais aussi pendant l'exploitation.

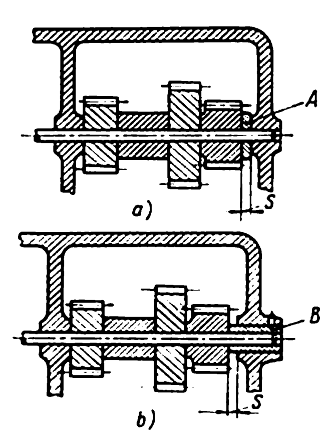


Fig. 124. Schéma d'assemblage suivant le procédé de réglage :
a — par l'anneau A choisi en fonction du jeu s; b — par le déplacement de la bague B

L'*assemblage par ajustage unitaire* consiste à obtenir la précision imposée non pas par la fabrication des pièces rigoureusement tolérancées, mais par l'ajustage individuel d'une pièce conjuguée

à l'autre. On donne le nom d'ajustage à un usinage manuel ou mécanique supplémentaire effectué dans le but d'obtenir l'ajustement, la géométrie et la qualité imposés de la surface conjuguée de la pièce.

Les travaux d'ajustage principaux sont le limage, l'ébavurage, le grattage, le rodage, le polissage, l'exécution des trous.

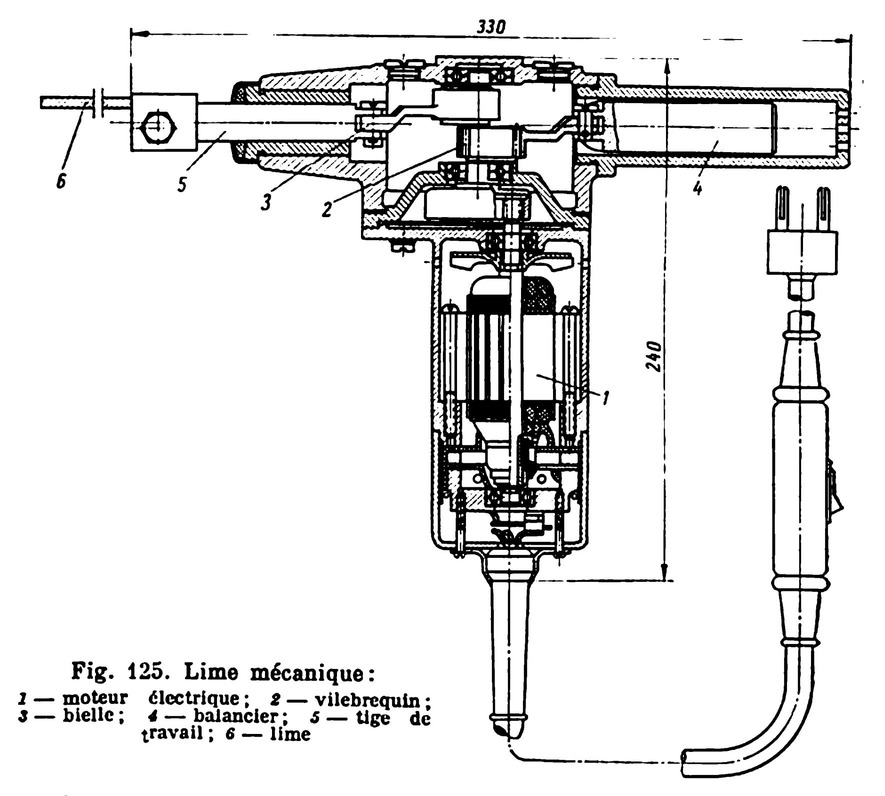


Fig. 125. Lime mécanique:
1 — moteur électrique; 2 — vilebrequin; 3 — bielle; 4 — balancier; 5 — tige de travail; 6 — lime

Dans le travail unitaire ou en petite série, et parfois même en série moyenne, le rôle de l'ajustage est très important; or la quantité de travail qu'il nécessite est très importante, alors que la qualification de l'opérateur doit être très élevée; on voit donc toute la portée de l'accroissement de la productivité des travaux.

Le *limage* a surtout pour objet d'enlever la surépaisseur afin d'obtenir la cote imposée par l'assemblage ou de corriger le défaut de position relative des surfaces résultant de l'ébauchage par suite de la redistribution des contraintes internes, par exemple.

Pour mécaniser le limage on emploie des machines dont l'outil est constitué d'un disque ou d'une bague à limer; des limes mécaniques (fig. 125); des limes rotatives électriques ou pneumatiques

(fig. 126); des meules à commande à arbre flexible (fig. 127) pour la finition des surfaces des pièces à encombrement important; des machines électriques universelles portatives à arbre flexible

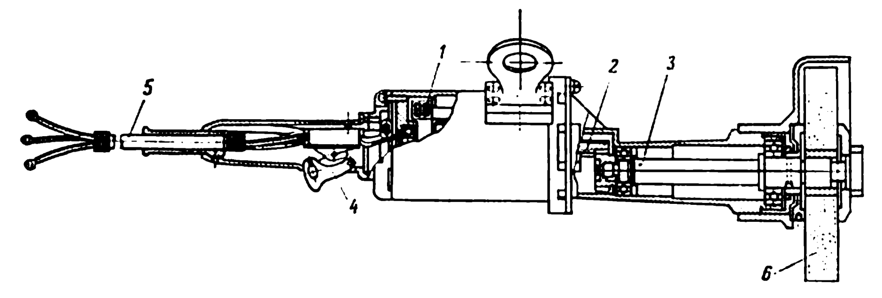


Fig. 126. Machine à limer et à meuler И-66:
1 — moteur électrique; 2 — transmission; 3 — broche; 4 — interrupteur; 5 — câble électrique; 6 — meule

(fig. 128) entraînant en rotation des limes rotatives ou des meules de formes différentes (fig. 129).

L'ébarbage à la lime douce et à la toile émeri se fait généralement sur le contour des pièces pour enlever les rugosités, empreintes, bavures, et parfois après le limage. L'appareillage de mécanisation est le même que pour le limage.

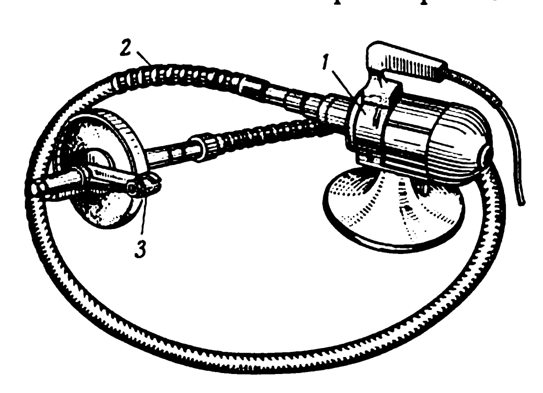


Fig. 127. Meule à commande И-54 à arbre flexible:
1 — moteur électrique; 2 — arbre flexible; 3 — tête à meuler

Le *grattage* s'emploie surtout pour assurer la planéité des surfaces conjuguées des glissières et des chariots qui s'y déplacent, pour obtenir un bon portage des surfaces au droit du joint. pour réaliser une surface d'appui imposée dans les paliers. Pour accroître la productivité, on utilise des têtes à gratter mécaniques commandées par bielle et manivelle ou d'une autre façon permettant de transformer le mouvement rotatif en mouvement alternatif; la rotation est transmise à la tête par un arbre flexible à partir d'un moteur électrique portatif. Des modes opératoires plus perfectionnés que le grattage sont la rectification, l'alésage et le parachèvement des trous par brochage.

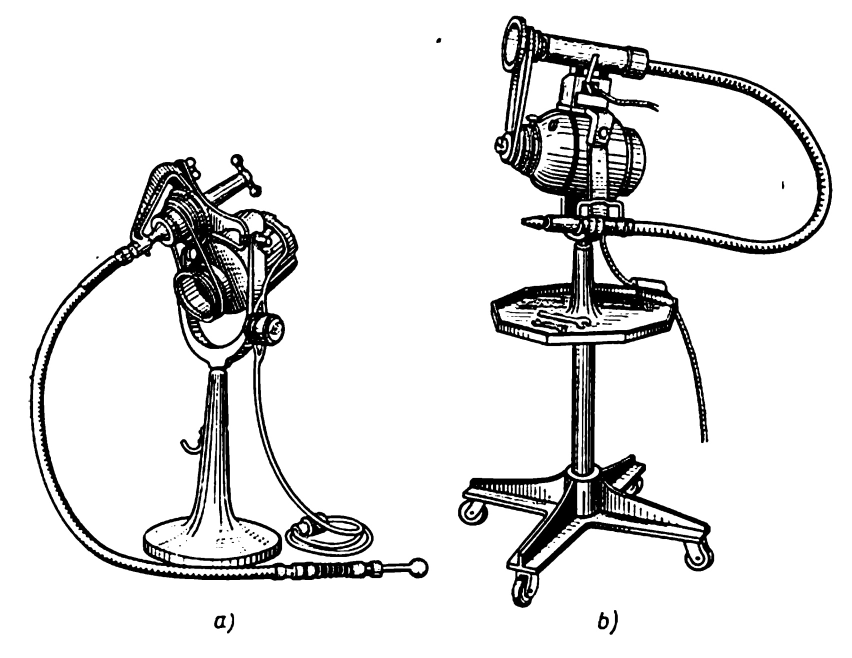


Fig. 128. Machines électriques universelles portative (*a*) et transportable (*b*) à arbre flexible

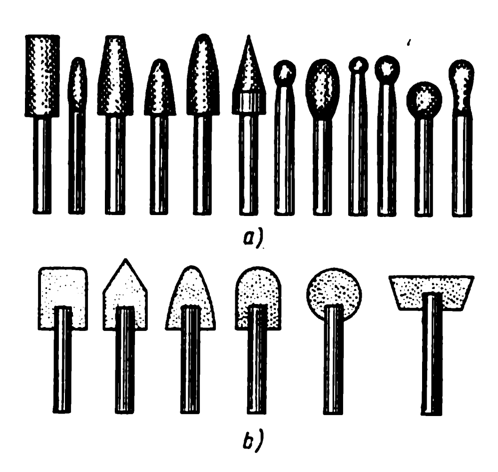


Fig. 129. Limes rotatives (*a*) et meules de forme (*b*)

Le *rodage* est appliqué lorsqu'il est nécessaire de rendre hermétique un assemblage (soupapes des moteurs à combustion interne, couples de plongeur des appareils de chauffage, etc.). Dans les travaux d'ajustage, les pièces conjuguées sont rodées directement. Le rodage sur des machines spéciales s'emploie en cours d'usinage; si les pièces conjuguées sont rodées directement, elles sont accouplées avant d'être acheminées vers l'assemblage.

Le *polissage* est un mode opératoire d'ajustage utilisé dans le but d'améliorer l'état de surface après le limage. L'opération s'effectue de la même façon que lors de l'application d'une meule douce, avec utilisation de poudres abrasives fines ou de pâtes à polir. Le polissage des tourillons des arbres se fait par rotation sur des montages simples à l'aide de cuir, de drap, de daim, enduits d'un mastic constitué de paraffine et de poudre abrasive fine, ou d'une pâte à polir.

L'*exécution des trous* se fait après la vérification de la position imposée des pièces conjuguées; les trous sont percés, parfois alésés; il arrive également qu'on réalise le lamage, pour loger la tête d'une vis ou un écrou, le fraisurage conique ou cylindrique, pour loger une tête noyée, et le filetage prévu pour des vis de blocage. L'équipement est choisi suivant l'encombrement des pièces conjuguées; l'exécution des opérations peut imposer l'utilisation des perceuses, des perceuses portatives pneumatiques (fig. 130) ou électriques (fig. 131); des perceuses à commande électrique universelle à arbre flexible; des perceuses radiales portatives (en construction mécanique lourde). Au besoin tous ces travaux se font avec application de divers montages prévus pour recevoir l'effort d'avance.

Les méthodes d'assemblage qui viennent d'être examinées s'emploient en principe dans tous les trois modes de fabrication et pour les différentes formes d'organisation de l'assemblage. L'assemblage à la chaîne des automobiles (production de masse), notamment, est régi essentiellement par le principe d'interchangeabilité totale; pourtant, plusieurs organes sont assemblés suivant le principe d'interchangeabilité de groupe (cylindre-piston; axe de piston-bielle-piston), suivant le principe d'assemblage par réglage (assemblages comportant un jeu de joints, etc.), ou, enfin, suivant le principe d'ajustage (rodage individuel des soupapes au siège); le fait que dans le cas de l'assemblage à la chaîne le rodage s'opère préalablement, et notamment, en cours d'usinage, ne change rien au principe du mode opératoire, car les pièces rodées sont fournies à la chaîne déjà accouplées et ne sont assemblées que par couples rodés. En construction mécanique lourde (travail unitaire), la part qui revient à l'ajustage individuel est très grande, mais on y applique également la méthode de réglage par joints ou par entretoises filetées; en même temps, la boulonnerie est exécutée avec

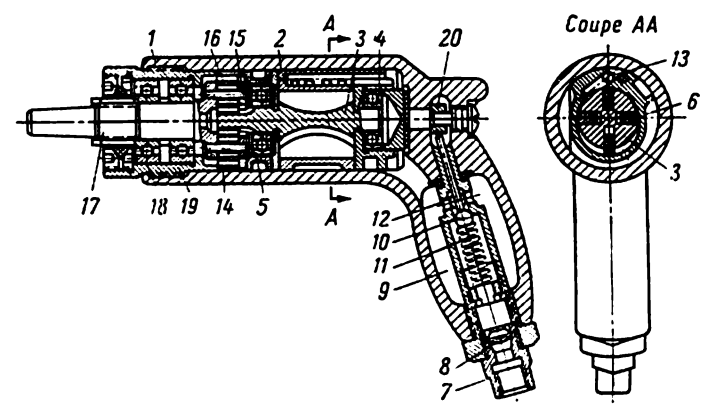


Fig. 130. Perceuse portative pneumatique PC-8:

1 — corps; 2 — stator; 3 — rotor; 4 et 5 — roulements à billes; 6 — palettes; 7 — valve pour flexible d'amenée d'air; 8 — tamis de filtrage; 9 — boîte; 10 — soupape à bille d'obturation; 11 — ressort; 12 — cheville repoussant la bille; 13 — canal d'amenée d'air; 14 — satellites du démultiplicateur; 15 — aiguilles des roulements à aiguilles; 16 — pignon; 17 — broche; 18 — roulements à billes de la broche; 19 — douille; 20 — gâchette de mise en marche à excentrique

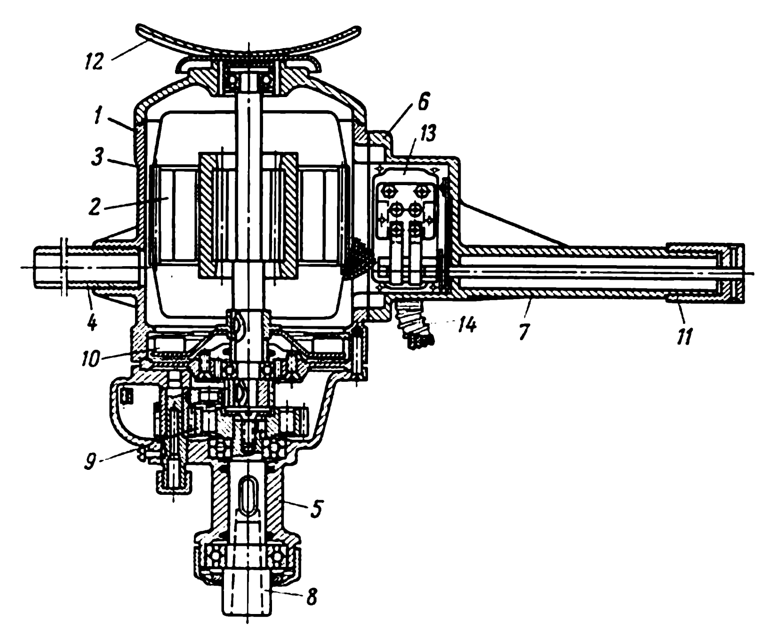


Fig. 131. Perceuse portative électrique И-29-А:

1 — corps; 2 — stator; 3 — rotor; 4 — poignée fixe; 5 — protecteur inférieur; 6 — protecteur supérieur; 7 — poignée de l'interrupteur; 8 — broche; 9 — démultiplicateur; 10 — ventilateur; 11 — chapeau de l'interrupteur; 12 — conscience; 13 — interrupteur; 14 — câble d'amenée de courant électrique

des tolérances qui assurent son interchangeabilité; ses éléments sont montés avec les pièces de base sur le principe de l'interchangeabilité totale. L'assemblage des ensembles normalisés, fabriqués généralement par séries, peut être régi soit par le principe d'interchangeabilité totale, soit par celui d'interchangeabilité de groupe; par ailleurs, il n'est pas exclu que l'assemblage des pièces normalisées unitaires avec les pièces de base rend possible le triage direct.

Le montage est une opération qui consiste à effectuer de nombreux assemblages fixes et mobiles. Les assemblages fixes servent à matérialiser une position relative fixe des éléments conjugués. Dans les assemblages mobiles les pièces conjuguées se déplacent l'une par rapport à l'autre. Les assemblages fixes, comme les assemblages mobiles, peuvent être permanents ou démontables. On appelle assemblages démontables ceux qui se prêtent au démontage sans nécessiter de grands efforts et sans endommager les éléments conjugués et les éléments de fixation. Les assemblages permanents sont ceux dont le démontage n'est pas prévu en exploitation; il est d'ailleurs difficile de le réaliser, mais lorsqu'il faut le faire, on doit soit endommager les pièces conjuguées, soit détruire les éléments de fixation ou le joint soudé.

Parmi les assemblages démontables fixes il y a les filetages, les clavetages et les assemblages cannelés. Il est fréquent qu'ils sont associés à un ajustement incertain (appuyés, appuyés 0 à appuyés à cheval, appuyés à cheval, à cheval) et comportent une portée conique.

Un assemblage par éléments filetés usuel s'obtient avec des goujons, des boulons ou des vis.

Les goujons s'emploient surtout pour conjuguer des surfaces planes directement ou avec interposition des joints. Avant de procéder à l'assemblage, les goujons sont vissés dans la pièce de base. Les procédés de pose des goujons sont illustrés par la figure 132; elle peut s'effectuer: a) avec deux écrous dont l'un tient le rôle de contre-écrou; pour le serrage, on agit sur l'écrou supérieur, pour desserrer, sur l'écrou inférieur; b) avec une clé employée lorsque l'hélice du filet inférieur est plus grande que celle du filet supérieur; c) avec un dispositif constitué d'un écrou *1* et d'une contre-vis *2*; une fois le goujon serré, la contre-vis est débloquée, après quoi l'écrou se dévisse aisément à la main; d) avec une clé constituée d'une douille *1* et d'une contre-vis *2* comportant une goupille *3* et un talon trempé *4*; la contre-vis pivote à un angle limité par la fente dans laquelle s'engage la goupille *3*; lorsque la douille *1* est vissée sur le goujon à poser, la contre-vis occupe la position supérieure; lorsque la face du goujon bute contre le talon *4*, la contre-vis se déplace quelque peu en bas et produit un serrage sur le filetage du goujon nécessaire pour le visser; pour dégager la clé il suffit de

tourner la contre-vis dans le sens opposé ; le serrage n'existant plus, la douille se déplace sans effort sur le filet du goujon. Les dispositifs décrits sont les plus simples ; il en existe encore d'autres qui entraînent le goujon en le serrant par sa surface filetée ou lisse et engendrant un effort de frottement susceptible d'assurer le vissage du goujon. Toutefois, tous ces procédés sont peu productifs. L'utilisation d'un appareil à goujonner électrique à tête à ouverture automatique accroît considérablement la productivité du travail.

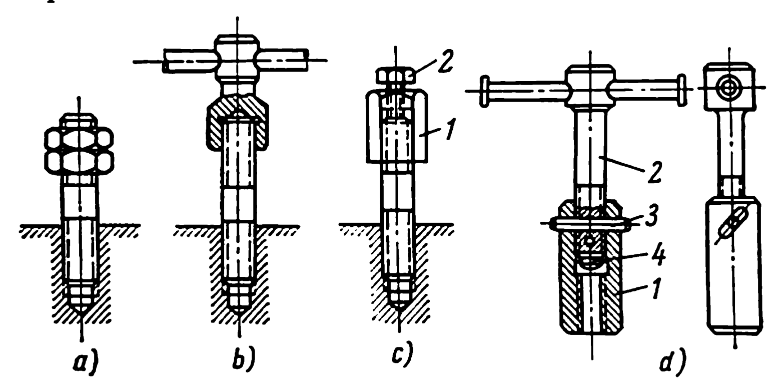


Fig. 132. Modes de serrage des écrous

Les goujons posés doivent être perpendiculaires au plan de conjugaison (l'écart admissible ne doit pas dépasser 0,3 à 1,5 μ par 1 mm de longueur de la partie du goujon en saillie) ; leur hauteur au-dessus de ce plan doit correspondre aux spécifications imposées. La perpendicularité du goujon peut être vérifiée à l'aide d'une équerre et d'une jauge d'épaisseur usuelles, alors que sa hauteur l'est avec un calibre à limites. La cote imposée de la partie du goujon en saillie est vérifiée avec des bagues de précision posées sur le goujon après son vissage à la main.

L'assemblage par boulons s'emploie dans le cas où les pièces conjuguées permettent l'exécution de trous débouchés prévus pour des boulons. Les vis s'emploient généralement lorsque le trou dans la pièce de base doit être borgne, et l'assemblage subit des démontages fréquents en exploitation. C'est pourquoi l'ajustement du filetage des assemblages à vis doit être moins serré que dans le cas des goujons ; de plus, le filetage de la vis et de la pièce de base doit se faire avec un soin particulier pour parer à une usure accélérée et à sa détérioration.

La réalisation des assemblages boulonnés et vissés à l'aide de clés et tournevis courants demande beaucoup de temps. Pour y pallier il faut mettre en œuvre un outillage manuel perfectionné. Telles

sont la clé à douille utilisée pour le serrage des écrous dans les endroits découverts; la clé à douille à levier à vilebrequin, qui réduit encore plus le temps de serrage de l'écrou; la clé à douille à charnière (fig. 133) employée lorsqu'il est impossible de se servir d'une clé à douille usuelle; la clé à cliquet (fig. 134) et la clé à friction (fig. 135) qu'on emploie dans les mêmes cas ainsi que pour des filetages exécutés suivant des ajustements avec serrage; la clé à douille à charnière et à cliquet, utilisée dans le même but mais lorsque l'accès est encore plus difficile.

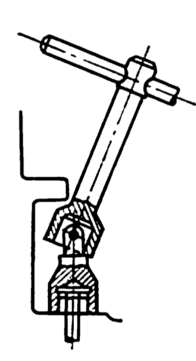


Fig. 133. Clé à douille à charnière

La construction de la clé à cliquet réversible représentée sur la figure 134 comporte le levier *1*, le rochet *2*, le couvercle *3* et les cliquets *4* serrés par le ressort *5*. Pour changer le sens de rotation il suffit de faire pivoter la tige *6* de 180° sur son axe. La cheville *7* repousse alors tel ou tel cliquet. Grâce à ses méplats, le ressort à lames *8* bloque alors la tige dans les positions extrêmes.

Pour assurer le couple de blocage imposé, on fait appel à des clés compensées.

La figure 136 représente une clé à douille compensée. La tige *1* porte fixée la tête de la clé *2*; la tige *1* est liée à la douille *3* par la

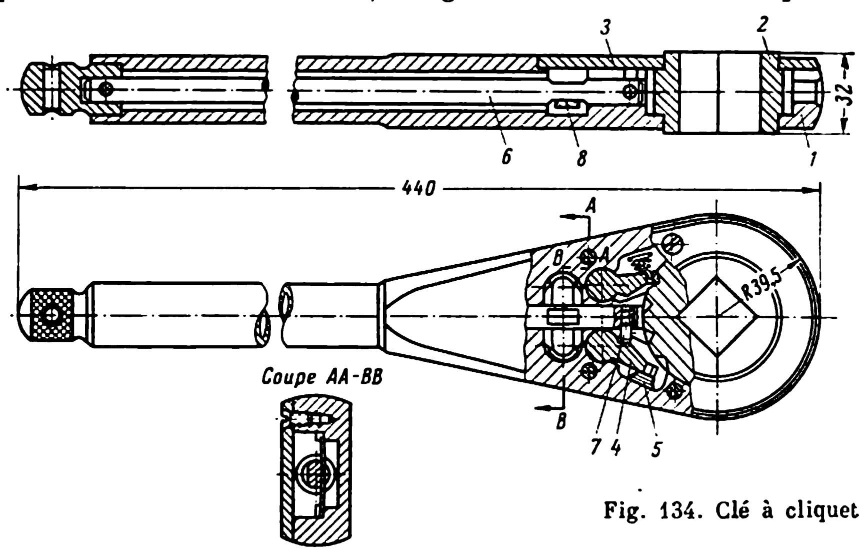


Fig. 134. Clé à cliquet

goupille *4*; la tête *5* et le levier *6* sont asservis à la tige *1* par la vis *7* et à la douille *3* par les crabots qui engrènent sous l'action

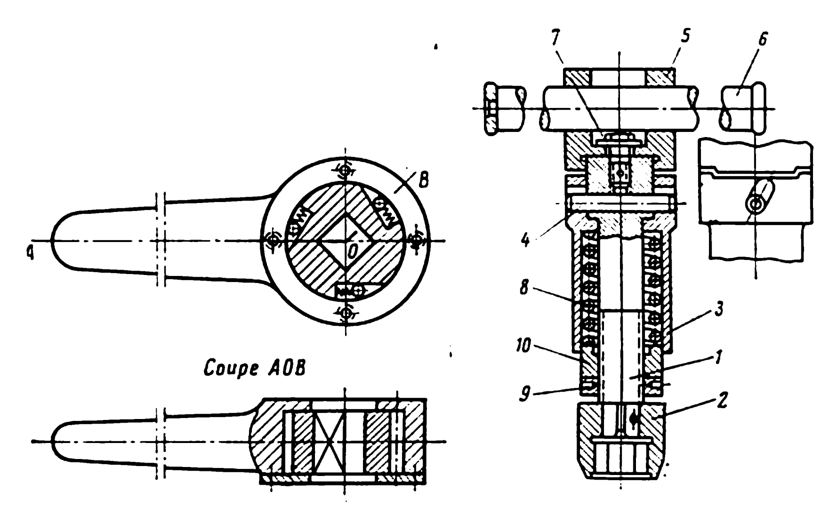


Fig. 135. Clé à friction

Fig. 136. Clé à douille compensée

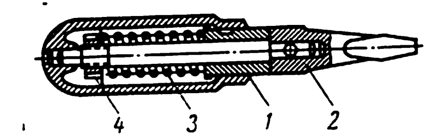


Fig. 137. Tournevis compensé

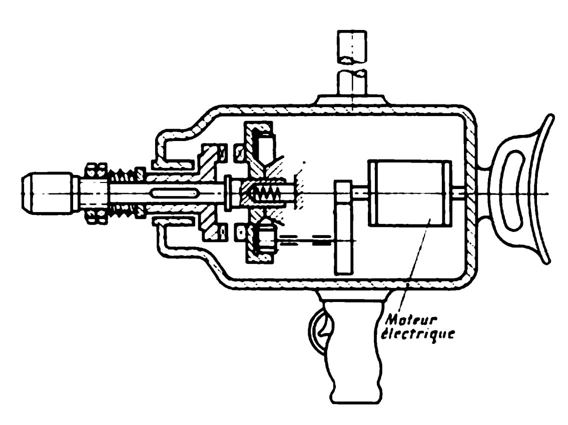


Fig. 138. Représentation schématique d'une boulonneuse électrique

du ressort *8*; la compression du ressort est réglée par les écrous *9* et *10*; le crabotage est débloqué lorsque l'effort sur la poignée *6* atteint la grandeur imposée déterminée par la compression du ressort *8* réglée au préalable; le déblocage s'effectue par suite du glissement de la cheville *4* sur la fente oblique de la douille *3*, qui est repoussée de la tête *5* tournant dans ces conditions à vide.

Pour réduire le temps nécessaire pour réaliser le vissage des assemblages à vis on emploie des tournevis mécaniques.

La figure 137 schématise un tournevis compensé dont le manchon *1* engrène par des crabots le tournevis *2* sous l'action du ressort *3* dont la compression est réglée par l'écrou *4*; l'engrènement des crabots cesse lorsque le couple de blocage atteint la grandeur définie par la compression du ressort *3*.

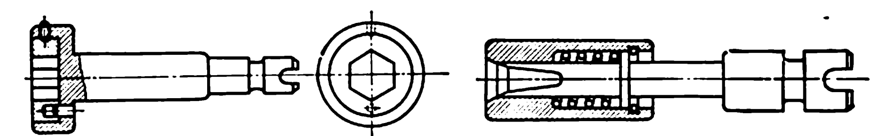


Fig. 139. Accessoire de boulonneuse électrique muni d'une clé à douille

Fig. 140. Accessoire de boulonneuse électrique muni d'un tournevis

Pour mécaniser l'exécution des assemblages boulonnés et à vis, on recourt à des machines électriques et pneumatiques qui accélèrent nettement la marche des opérations en améliorant la qualité des assemblages grâce au serrage plus uniforme. L'utilisation des machines pneumatiques est plus rare que celle des machines électriques, leur poids étant très important.

La figure 138 représente une machine portative électrique pour réaliser le vissage des boulonnages et des assemblages à vis. Sa broche peut recevoir divers outillages qui déterminent sa destination. En y fixant une clé à douille, on obtient une boulonneuse ou une machine à goujonner; la pose d'un tournevis la transforme en un tournevis mécanique.

Lorsque le couple de blocage imposé à l'assemblage à vis est atteint, les crabots biseautés du manchon écartent les disques en surmontant la résistance du ressort dont la compression est réglée suivant le couple de blocage imposé.

L'utilisation des moteurs électriques rapides (10 000 à 12 000 tr/mn) réduit le poids de ces machines par unité de puissance. L'alimentation des moteurs électriques en courant alternatif d'une fréquence élevée (180 à 200 per/s) demande l'emploi d'un convertisseur spécial.

Pour assurer la sécurité, le corps de ces machines est mis à la terre, et dans ce but, un conducteur supplémentaire spécial est prévu.

Les broches des machines à assembler électriques comportent un dispositif pour recevoir les outillages nécessaires. La clé à douille (à tête amovible) est représentée sur la figure 139, et le tournevis, sur la figure 140. La figure 141 représente une tête à ouverture automatique pour le serrage mécanique des goujons. Le goujon est serré par le filet intérieur des mordaches *1* retenues par l'axe *2*. Le serrage des mordaches est lâche d'abord, mais lorsque la face du goujon vient buter contre le bouton *3*, les mordaches s'engagent à l'intérieur de la bague *4* à laquelle elles sont rendues solidaires à l'aide des billes *5*; les mordaches, comprimées par la partie conique de la bague *4*, bloquent alors le goujon dans le mandrin. Les crabots du manchon *6* entraînent les dents de la bague *4*, le goujon commence à tourner et à se visser dans le filet de la pièce de base.

La hauteur de la partie du goujon en saillie est réglée par le bol; lorsque ce dernier bute contre le plan de la pièce de base, la bague *4* continue à tourner et à descendre jusqu'à ce que les dents de sa face désengrènent avec les crabots du manchon *6*. A ce moment, les mordaches *1* s'ouvrent et dégagent le goujon. Dans la queue *7* la tête du ressort *8* bute contre la vis *9*. La queue *7* porte fixé le demi-manchon craboté *11* qui engrène avec le demi-manchon *12*. Lorsque le goujon est vissé à refus, la douille *13* s'arrête, mais la queue *7* continue à tourner avec la broche. Les crabots du demi-manchon *12* montent alors en glissant sur la rampe des crabots du demi-manchon *11* tout en repoussant en haut la douille *13* et réalisant ainsi à l'aide du plongeur *10* la compression du ressort *8* et le serrage du goujon vissé. Le mouvement ascendant ultérieur de la douille *13* désengrène les crabotages du manchon *6* et coupe la transmission du couple au goujon. L'inconvénient des têtes à serrage des goujons par le filet est l'allongement des filets prévus pour

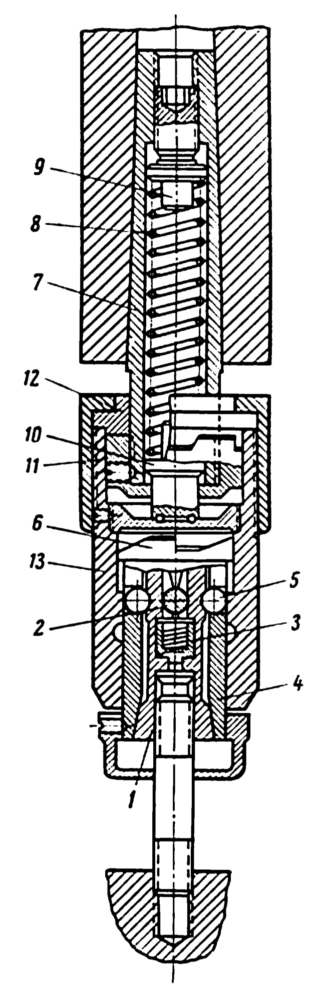


Fig. 141. Tête à ouverture automatique pour le serrage mécanique des goujons

l'écrou. De ce fait, lorsque le serrage de la partie ajustée du goujon est important, il est plus avantageux de retenir le goujon par la partie lisse et non par le filet.

Les boulonneuses à percussion, dont une des variantes est représentée sur la figure 142, connaissent ces derniers temps une grande extension. Ces boulonneuses sont constituées d'un corps assemblé *1* dans lequel logent le moteur pneumatique à rotor *2* à cinq palettes, le mécanisme de percussion à rouleaux et la broche *3* avec le bonhomme de verrouillage pour les clés à douille amovibles. La rotation de l'arbre du moteur pneumatique est transmise à la bague *4* des rouleaux *5*. La bague en tournant agit sur les rouleaux qui portent sur les bossages de la broche des coups en lui communiquant des impulsions percussives susceptibles de produire le couple de blocage nécessaire pour réaliser l'assemblage à vis. Le renversement de la rotation est réalisé en changeant la direction du refoulement de l'air comprimé à l'aide du tiroir *6*. Le dispositif de lancement monté dans la poignée de la boulonneuse est actionné par la gâchette *7*.

Les avantages que présente cet appareil sont le faible poids dû à l'absence d'un démultiplicateur, et l'absence d'un moment de torsion qui dans d'autres constructions de boulonneuses est perçu par les bras de l'ouvrier.

La boulonneuse est prévue pour le travail avec des filetages allant jusqu'à 6 mm ; elle fonctionne à la pression de l'air de 5 à 6 at et porte de 2500 à 3000 coups par minute. Le poids de la boulonneuse est d'environ 2 kg, son encombrement, 180 × 219 × 65 mm.

La figure 143 représente une boulonneuse hydraulique prévue pour le serrage des écrous, des vis, des boulons et des goujons depuis M10 à M12, ainsi que pour l'exécution des trous (perçage, alésage).

L'huile est refoulée sous pression par la pompe dans le flexible métallique, passe par la poignée *1* dans la direction du tiroir *2* et lorsqu'on appuie sur la gâchette *3* arrive par les canaux du corps jusqu'aux vis *4* et *5*. Le couple est transmis depuis la vis de commande *5* actionnée par la pression de l'huile à travers un démultiplicateur à la broche portant une tête amovible à douille *9*. Après avoir passé par les vis du moteur hydraulique, l'huile perd sa pression pour être acheminée vers la vidange à travers le démultiplicateur, la poignée creuse et le flexible extérieur.

La valeur du couple de blocage est réglée par la modification de la pression d'huile refoulée vers la boulonneuse.

Parmi les avantages de la boulonneuse hydraulique il y a son fonctionnement sans bruit, son rendement élevé (0,55 à 0,65, au lieu de 0,07 à 0,11 et de 0,4 à 0,5 respectivement dans le cas des boulonneuses pneumatiques et électriques) et son faible poids.

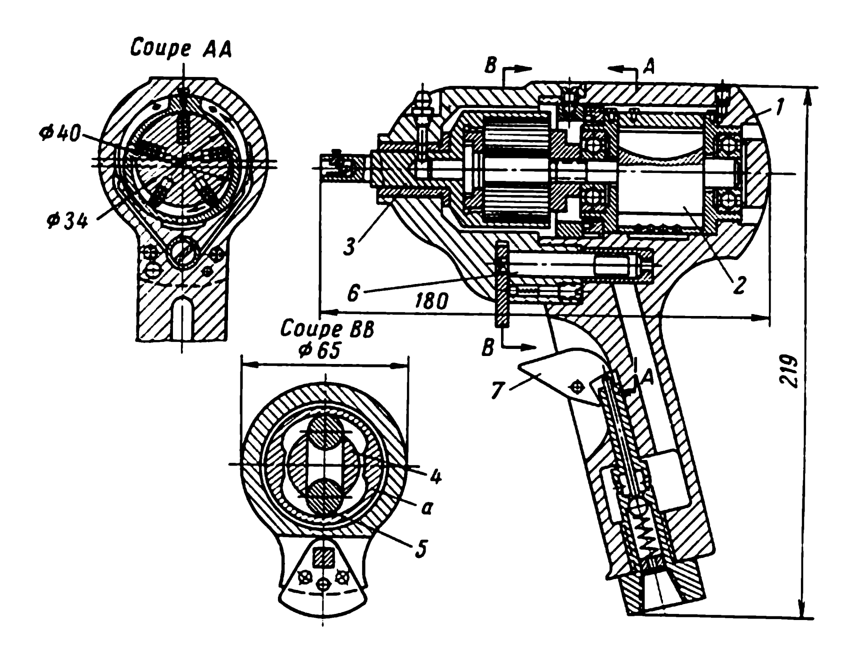


Fig. 142. Boulonneuse pneumatique réversible à percussion

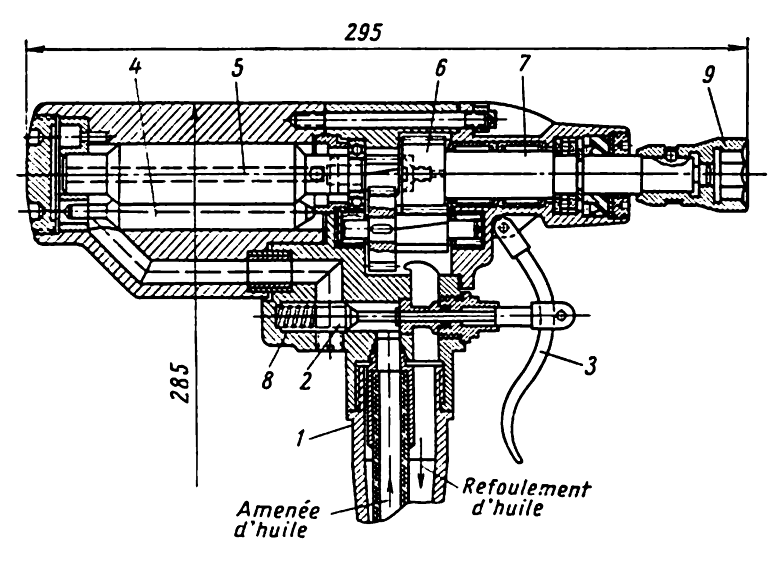


Fig. 143. Boulonneuse hydraulique prévue pour des filetages M10 à M12 (type УГР-10):

1 — poignée; *2* — tiroir; *3* — gâchette; *4* et *5* — vis du moteur hydraulique; *6* — pignon commandé du démultiplicateur; *7* — broche; *8* — ressort du tiroir; *9* — tête à douille de rechange

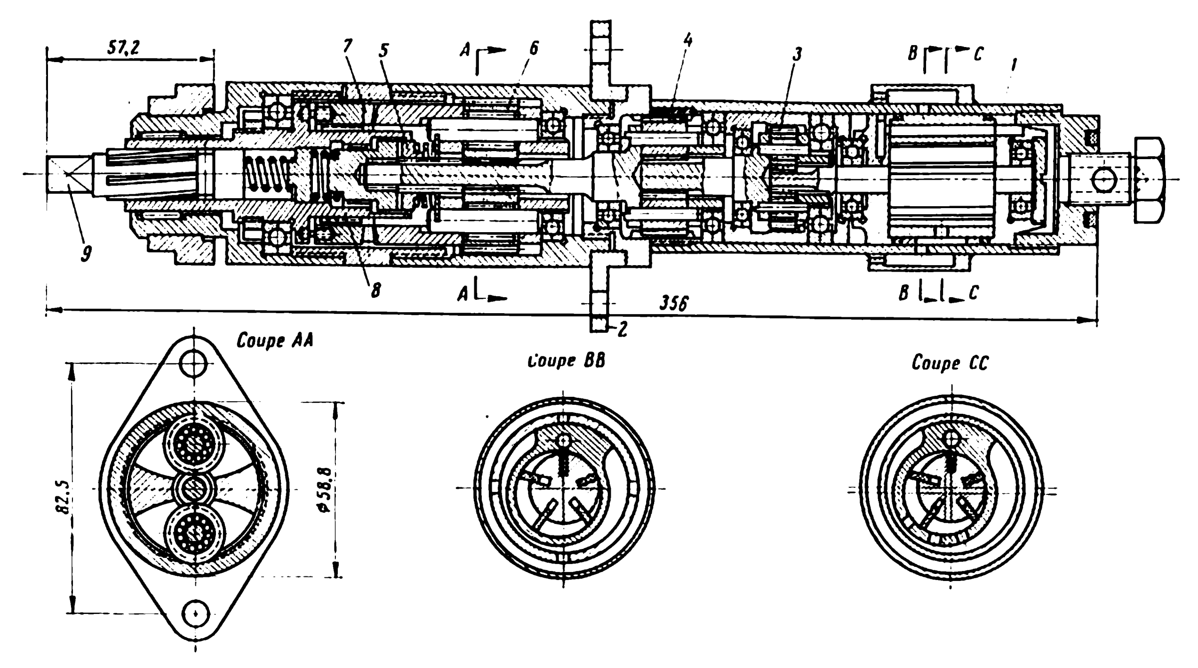


Fig. 144. Ensemble normalisé d'une boulonneuse pneumatique à deux vitesses

Le couple de blocage appliqué à la clé d'une telle boulonneuse est de 5 kgm ; elle fonctionne à la vitesse de 350 tr/mn. La pression d'huile dans le flexible d'amenée atteint 60 kg/cm², dans celui de vidange, 6 kg/cm² ; le débit d'huile est de 20 l/mn. La boulonneuse pèse 2,4 kg.

La figure 144 représente un ensemble normalisé d'une boulonneuse pneumatique à deux vitesses prévu pour équiper des types de machines multibroches variées susceptibles d'être utilisées pour le serrage des boulonnages dont les entraxes ne sont pas inférieures à 60 mm. Les boulonneuses de ce type permettent de serrer des écrous aux filets allant jusqu'à M30; leur organisation est telle que le vissage des écrous s'effectue avec un couple de blocage faible et à une grande vitesse, alors que le serrage définitif l'est à une vitesse inférieure, mais avec un couple de blocage important. La valeur du couple est réglée par la pression de l'air comprimé refoulé vers la boulonneuse.

La boulonneuse est composée d'un corps cylindrique démontable *1* comportant dans sa partie médiane un flasque *2* avec des trous prévus pour les boulons. Sa partie supérieure porte un moteur pneumatique à palettes; la rotation de ce moteur est transmise à la broche *8* par les démultiplicateurs du premier étage *3* et du deuxième étage *4*, et le manchon de rotation accélérée *5* (pour visser), ou par le démultiplicateur *6* et le manchon de rotation ralentie *7* (pour réaliser le serrage définitif) ; la broche *8* transmet le mouvement à l'aide du carré *9* à la clé à douille de rechange. Le vissage libre de l'écrou s'effectue par l'intermédiaire du manchon *5*. Lorsqu'en fin de vissage de l'écrou la résistance s'accroît, le passage à la vitesse réduite s'opère automatiquement; le couple imposé pour assurer le serrage définitif est alors transmis par le démultiplicateur *6* et le manchon *7*. Ce principe permet d'accroître la productivité et de diminuer le débit d'air comprimé.

Les boulonneuses pneumatiques à deux vitesses fonctionnent sous une pression d'air de 5 à 6 at, le débit d'air à la pression ordinaire étant de 0,736 m³/mn. La vitesse en marche à vide est de 356, 530 ou 840 tr/mn ; le couple de blocage fourni à la clé est de 19,9; 13,3 ou 8,3 kgm, suivant la variante de la boulonneuse. Son poids est de 4,3 kg.

La figure 145 représente l'ensemble normalisé d'une boulonneuse hydraulique à vis à une vitesse. Le corps *1* porte monté le moteur hydraulique à vis *2*, les démultiplicateurs du premier étage *3* et du deuxième étage *4*. La broche *5* porte l'embout *6* prévu pour la fixation de l'outillage.

La figure 146 montre l'assemblage d'une boulonneuse multibroche à partir d'ensembles normalisés. La boulonneuse représentée est montée à partir des ensembles à deux vitesses à l'action pneumatique dont la construction est donnée par la figure 144.

Les ensembles normalisés *1* sont répartis en fonction de la disposition des écrous sur le produit à monter et fixés à la plaque

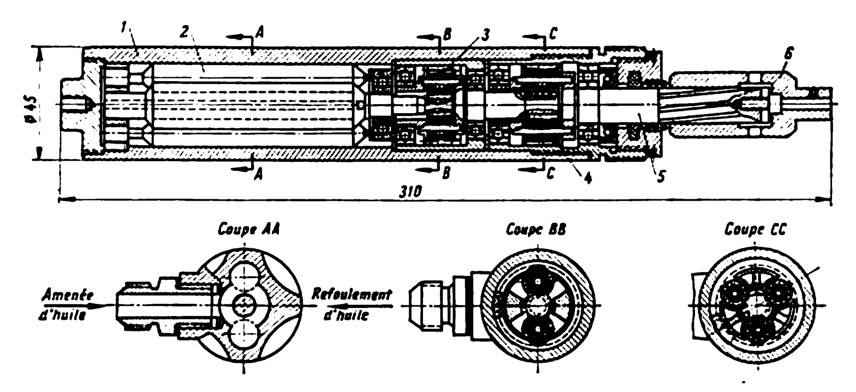


Fig. 145. Ensemble normalisé d'une boulonneuse hydraulique à vis à une vitesse

d'appui principale *2* et à la plaque intermédiaire *3*. L'air comprimé est amené à travers le flasque *4* et les canaux dans la plaque de

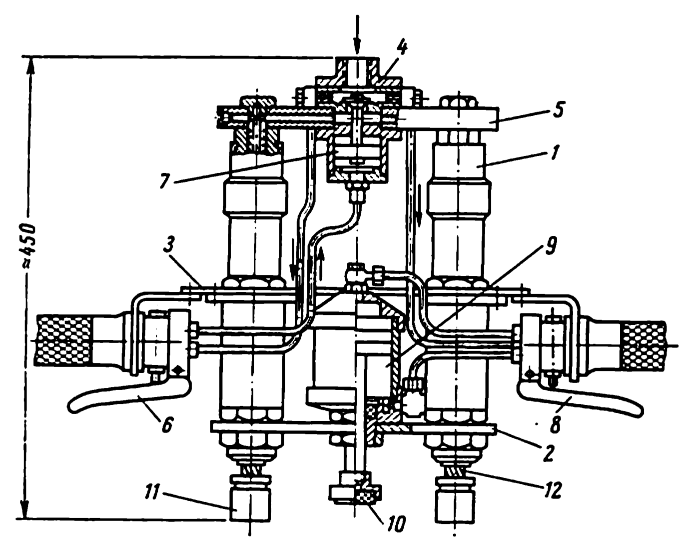


Fig. 146. Assemblage d'une boulonneuse à quatre broches à partir d'ensembles pneumatiques normalisés à deux vitesses

distribution d'air *5*. La boulonneuse est mise en marche en appuyant sur la poignée *6* qui agit sur le piston *7* pour ouvrir la soupape d'admission du cylindre de mise en marche. La poignée *8* sert pour

brancher le cylindre *9* de l'extracteur *10* pour dégager sans effort la clé des écrous ou des têtes de vis déjà serrées. Les clés à douille *11* sont entraînées en rotation par les broches *12*. Pour rendre le travail plus aisé et réduire la fatigue de l'opérateur due au poids important de l'appareil, ce dernier est suspendu sur des poulies à ressort. Lorsque l'assemblage se fait en chaîne continue, les poulies sont

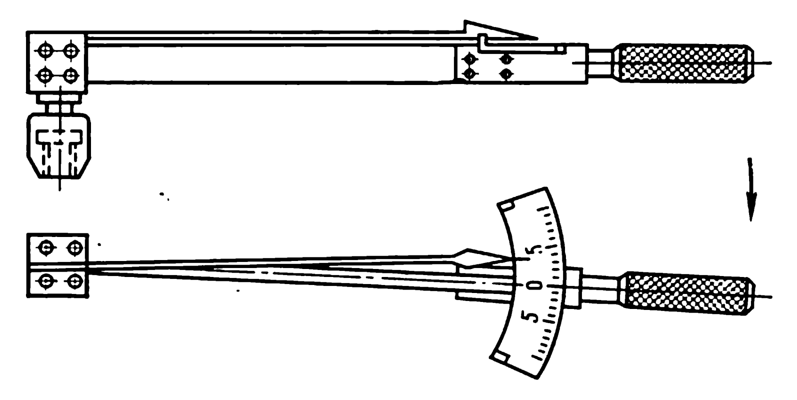


Fig. 147. Clé dynamométrique

montées sur des chariots se déplaçant sur des monorails. La manutention d'un outillage lourd est facilitée par deux poulies accouplées.

En construction mécanique lourde on utilise des machines électriques lourdes ou des perceuses radiales équipées de mandrins spéciaux sous forme de clés à douille.

La mise en œuvre d'un outillage mécanique réduit jusqu'à 10 fois le temps nécessaire pour l'exécution des assemblages boulonnés ou vissés par rapport à l'action manuelle.

Le serrage manuel des boulons, des goujons et des vis effectué avec un outillage courant ne peut être vérifié que d'une manière subjective; il est donc plus avantageux de recourir à un outillage compensé ou à des clés dynamométriques (fig. 147).

En cours d'assemblage, les écrous et les vis doivent être serrés dans un ordre défini, illustré par les figures 148 et 149. Si les surfaces accouplées sont rectangulaires, le serrage se fait à partir du milieu et non pas des bords, car dans le cas d'une longueur importante, les défauts de planéité peuvent entraîner le gauchissement de la pièce. Un ordre arbitraire de serrage des vis et des écrous peut également gauchir ou au moins voiler la pièce. D'autre part, le serrage doit s'opérer non seulement dans un ordre déterminé, mais encore progressivement, en deux ou trois reprises.

L'application des boulonneuses multibroches accroît la productivité tout en assurant un serrage régulier de tous les écrous.

Les clavetages sont réalisés à l'aide des clavettes coniques, parallèles et disque. Si l'assemblage prévoit la fixation par clavette conique, l'axe de la pièce femelle se déplace par rapport à l'axe de l'arbre à la valeur du jeu d'ajustement provoquant ainsi un faux rond d'autant plus grand que le jeu d'ajustement est plus important. D'autre part, la différence entre les dépouilles de la rainure de la pièce femelle et de la clavette provoque le gauchissement de la pièce posée sur l'arbre.

Les clavettes parallèles ou disque sont posées sur l'arbre avec un serrage égal au moins à l'ajustement à cheval. L'ajustage de la

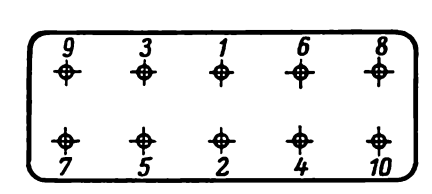


Fig. 148. Schéma de serrage des écrous d'une culasse ou d'un couvercle rectangulaires: les chiffres indiquent l'ordre opératoire

Fig. 149. Ordre de serrage des écrous d'un flasque ou d'un couvercle rond

clavette dans la rainure de l'arbre s'effectue avec un soin particulier pour prévenir le gauchissement de la clavette, par suite de l'engagement de son bord dans le corps de l'arbre ou du bord de la rainure de l'arbre dans le corps de la clavette; le mieux est de poser la clavette dans la rainure sous presse ou à l'aide d'un serre-joint et d'une plaque spéciale à rainure de faible profondeur montée sur la clavette; la pression est alors transmise suivant l'axe de symétrie de la clavette et distribuée uniformément sur toute sa longueur. L'ajustement usuel des clavettes au marteau demande une grande aptitude professionnelle, car les coups portés avec une force irrégulière et excentriquement provoquent le gauchissement de la clavette dans les sens transversal et axial.

La fixation à l'aide d'une clavette parallèle ou disque impose un jeu entre le plan supérieur de la clavette et le fond de la rainure de la pièce femelle; ce principe assure le centrage de la pièce femelle.

La vérification du gauchissement et de la hauteur de la partie en saillie d'une clavette peut se faire à l'aide d'un vé centré par les pans de la partie en saillie de la clavette, et par un jeu de jauges d'épaisseur.

Parmi les assemblages cannelés (fixes) on distingue ceux qui sont montés à force et ceux qui ne demandent pas d'effort important pour leur démontage, caractéristique définie par l'ajustement des éléments de centrage. Si l'assemblage est réalisé à force, il est recommandé de réchauffer au préalable les pièces femelles jusqu'à une température de 100 à 120°; ainsi on réduit nettement l'effort nécessaire tout en assurant un ajustement judicieux. Dans le cas des

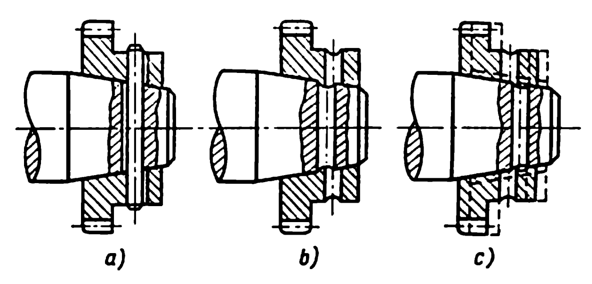


Fig. 150. Montage d'une pièce sur une portée conique solidarisée par cheville

assemblages facilement démontables la pose des pièces femelles s'effectue sans grand effort. Avant de procéder à l'exécution d'un assemblage, il faut éliminer toutes les bavures et empreintes occasionnelles. Les assemblages cannelés sont vérifiés au faux-rond et au battement axial, en montant l'arbre entre les pointes des poupées d'un appareil à vérifier, et au balancement, c'est-à-dire au déplacement angulaire, apprécié généralement à la main.

Les assemblages par goupilles sont réalisés à l'aide des goupilles cylindriques ou coniques.

Les goupilles s'emploient non seulement pour solidariser les pièces, mais encore pour réaliser le calage qui définit leur position relative.

Lors de la mise en œuvre des goupilles pour l'exécution des assemblages comportant une portée conique (fig. 150,*a*), cette dernière doit être percée assemblée avec la pièce femelle. Sinon, lors de la réalisation de l'assemblage, les trous prévus pour la goupille, exécutés séparément dans les deux pièces, ne coïncideront pas par suite des écarts entre les diamètres de la portée et du trou coniques; alors, soit la goupille ne pourra pas être engagée dans le trou (fig. 150,*b*), soit la pièce femelle ne sera pas bien ajustée sur la portée conique (fig. 150,*c*). Il est donc plus avantageux de finir le perçage et l'alésage de tels trous pendant le montage; la pièce femelle peut être percée préalablement en cours d'usinage.

Les assemblages fixes permanents sont ceux dont le serrage est bien marqué; ils peuvent être réalisés par agrafage, laminage, rivetage, soudage, brasage, collage et estampage à froid.

Le montage à force est obtenu soit par ajustements pressés, soit par action thermique sur les pièces conjuguées. Un ajustement pressé est réalisé sur une presse, la pièce mâle étant engagée à force dans la pièce femelle, ou inversement, la pièce femelle posée à force sur la pièce mâle. Dans ces conditions le serrage intervient en engendrant des déformations élastiques et plastiques dans les pièces conjuguées et surtout dans leurs couches superficielles; ces déformations produisent à la surface du joint des pressions normales importantes.

La force F_n nécessaire pour réaliser un emmanchement à force est donnée par la formule

$$F_n = f_n p \pi d l \text{ kg}, \qquad (100)$$

où f_n est le coefficient d'emmanchement à force ou le coefficient de frottement (cohésion) produit par l'emmanchement;

p, la pression spécifique exercée sur les surfaces conjuguées, en kg/mm²;

d, le diamètre nominal de l'assemblage, en mm;

l, la longueur des surfaces d'ajustement, en mm.

Le coefficient de frottement est choisi suivant le matériau des pièces conjuguées, l'état des surfaces usinées, le graissage et la pression spécifique exercée sur les surfaces conjuguées. Il augmente avec l'amélioration de l'état de surface jusqu'à un certain optimum, pour diminuer ensuite, même si l'état de surface s'améliore toujours; cette diminution est fonction de la pression spécifique; avec l'élévation de celle-ci, la diminution est d'abord brusque, puis devient plus lente; la diminution brusque du coefficient de frottement en fonction de l'augmentation de la pression spécifique s'observe dans les conjugaisons dont l'état de surface des portées est amélioré.

Voici des chiffres susceptibles de guider le choix du coefficient de frottement f_n: pour le cas d'un arbre et d'une bague en acier 30 à 50 (lubrification à l'huile pour machines), $f_n = 0{,}06$ à $0{,}22$; en fonte СЧ28-48, $f_n = 0{,}06 \div 0{,}14$; en alliage magnésium-aluminium, $f_n = 0{,}02 \div 0{,}08$; en laiton, $f_n = 0{,}05 \div 0{,}10$; en matières plastiques, $f_n = 0{,}54$.

En désignant par:

D le diamètre extérieur du moyeu, en mm;

d_0 le diamètre du trou d'un arbre creux, en mm;

i le serrage de l'ajustement, en mm;

E_A le module d'élasticité du matériau de la bague, en kg/mm²;

E_B le module d'élasticité du matériau de l'arbre, en kg/mm²,

on obtient la formule qui donne la valeur de p:

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{i}{\left(\frac{C_A}{E_A} + \frac{C_B}{E_B}\right)}; \qquad (101)$$

dans ces conditions

$$C_A=\frac{D^2+d^2}{D^2-d^2}+\mu_A=\frac{\left(\frac{D}{d}\right)^2+1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2-1}+\mu_A;$$

$$C_B=\frac{d^2+d_0^2}{d^2-d_0^2}-\mu_B=\frac{1+\left(\frac{d_0}{d}\right)^2}{1-\left(\frac{d_0}{d}\right)^2}-\mu_B,$$

où μ_A et μ_B sont des coefficients de Poisson des matériaux respectifs des pièces mâle et femelle (pour l'acier, $\mu = 0{,}3$; pour la fonte. $\mu = 0{,}25$).

Le serrage maximal i_{max} se calcule suivant la formule

$$i_{max}=(d_{B_{max}}-d_{A_{min}})-(H_B+H_A)\,10^{-3}, \qquad (102)$$

où $d_{B_{max}}$ est le diamètre limite maximal de l'arbre en mm;
$d_{A_{min}}$, le diamètre limite minimal du trou en mm;
H_B et H_A, la hauteur (H_{moy}) des rugosités superficielles de l'arbre et du trou en μ.

Lors d'un montage forcé la forme des bords des surfaces conjuguées joue un grand rôle. Le bord de l'arbre doit être biseauté de façon que l'angle du cône soit $\alpha \approx 10$ à 15°, mais ne dépasse pas 20°, car cette augmentation accroît la valeur de F_n. Le biseau pratiqué sur l'arête de la pièce femelle doit avoir un angle de 45 à 30° (angle du cône 90 à 60°); lors de l'emmanchement ce biseau rend plus aisé le centrage et élimine les grippages locaux éventuels.

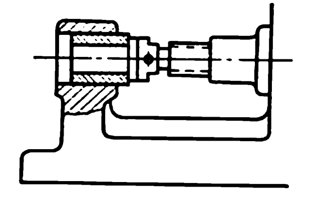


Fig. 151. Montage à force à l'aide d'un cric

Lorsque la forme ou l'encombrement de la pièce de base interdisent sa pose sur la table d'une presse, le montage à force s'effectue à l'aide d'un cric (fig. 151), d'un serre-joint ou d'un poids manœuvré par une grue. Dans plusieurs cas on utilise des presses portatives ou des étriers de divers types. La figure 152 représente un étrier à cylindre hydraulique pour la pose à force des chevilles et d'autres pièces de ce genre.

Lorsqu'on appuie sur le bouton de l'interrupteur *1* placé sur la poignée *2*, l'air comprimé est refoulé par le détendeur vers le vérin hydraulique (fig. 153) d'où il chasse l'huile qui est refoulée par la canalisation vers le cylindre *3*. En se déplaçant à gauche, la tige du cylindre emmanche à force la goupille *a* dans le trou de la pièce bloquée entre l'axe *4* et le mandrin *5*. L'effort produit par ce montage à force est reçu par l'étrier *6*. L'œillet *7* sert pour sus-

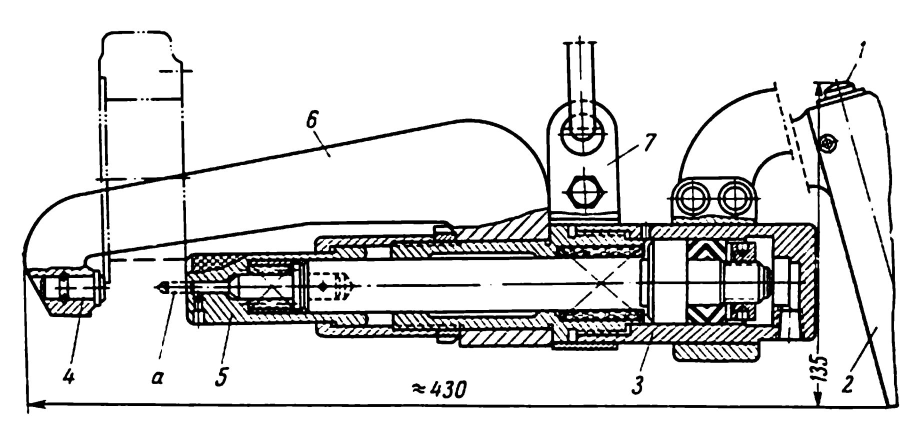


Fig. 152. Etrier à cylindre hydraulique pour la pose à force des chevilles

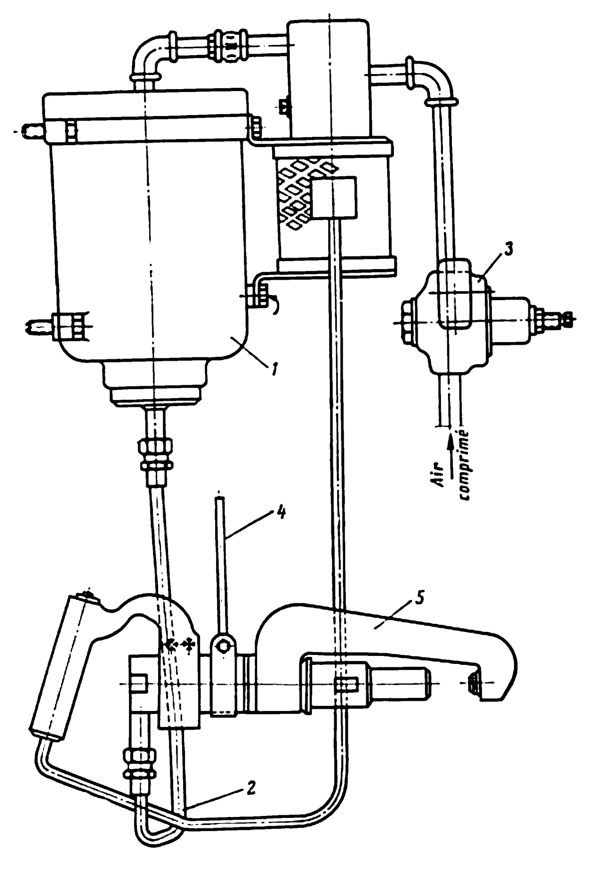


Fig. 153. Schématisation de l'installation pour l'emmanchement à force des chevilles par étrier à cylindre hydraulique représenté sur la fig. 152

pendre l'étrier au poste de travail. L'ensemble de l'appareil (fig. 153) comporte le vérin hydraulique *1*, le flexible *2*, le détendeur *3* et le support *4* fixé à l'œillet de l'étrier *5*.

Pour obtenir un bon ajustement pressé, on met en œuvre des dispositifs spéciaux. Tel est, notamment, le montage de la fig. 154 qui sert à parer au fléchissement d'un arbre long lors de l'emmanchement à force d'un disque.

La liaison par l'application de la chaleur s'emploie surtout pour conjuguer des éléments très chargés, car la résistance de tels assemblages est de 2 à 3 fois supérieure à celle des cas courants; il en est

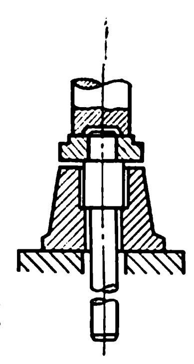


Fig. 154. Montage pour l'emmanchement à force d'un disque sur un arbre long

ainsi parce que les rugosités ne sont pas aplanies, mais s'accrochent entre elles d'une façon très forte. Les liaisons par l'action thermique sont justifiées également dans le cas des pièces de grand diamètre et de faible longueur de conjugaison (pose des bandages, des couronnes dentées, etc.), lorsque l'ajustement sous presse peut provoquer des gauchissements. La température du chauffage varie dans des limites très larges depuis 75 à 450°, suivant l'importance du serrage. Cette température peut être définie par la relation

$$\Delta d_A = \alpha \Delta t d_A,$$

d'où

$$\Delta t = \frac{\Delta d_A}{\alpha d_A},$$

où Δd_A est l'accroissement du diamètre du trou de la pièce femelle;
α, le coefficient de dilatation linéaire;
Δt, l'accroissement de la température, c'est-à-dire la différence entre la température finale et la température initiale de la pièce;
d_A, le diamètre initial du trou de la pièce femelle.

Pour obtenir une pose libre de la pièce femelle sur la pièce mâle, l'accroissement du diamètre du trou Δd_A doit être quelque peu supérieur au serrage i, c'est-à-dire $\Delta d_A > i$ ou $i < \Delta d_A$.

En remplaçant Δd_A par la valeur de i, il vient $i < \alpha \Delta t d_A$, d'où $\Delta t > \frac{i}{\alpha d_A}$.

En tenant compte du fait que Δt est la différence entre la température finale t_f et la température initiale de la pièce t_i, on tire

$$\Delta t = t_f - t_i$$

et donc,

$$t_f - t_i > \frac{i}{\alpha d_A}$$

ou

$$t_f > \frac{i}{\alpha d_A} + t_i.$$

Dans ce cas, le serrage est défini comme la différence entre les diamètres de l'arbre et du trou, car, ainsi que nous l'avons déjà dit, l'aplanissement des rugosités n'a pas lieu et les mesurages des diamètres de l'arbre et du trou se font de fait suivant les crêtes des rugosités; on a donc

$$i = d_B - d_A.$$

Il convient également de retenir la valeur du coefficient K de la chute de chaleur lors de l'exécution de l'ajustement; le coefficient K est défini par la commodité de l'exécution de l'assemblage et les particularités de fonctionnement de la pièce femelle.

Ainsi nous pouvons écrire définitivement

$$t_f > \left(\frac{d_B - d_A}{\alpha d_A} + t_i\right) K. \qquad (103)$$

Pour le calcul de la température d'échauffement, le coefficient de dilatation linéaire α peut prendre les valeurs suivantes:

Acier et fonte	$11{,}5 \cdot 10^{-6}$
cuivre	$16{,}5 \cdot 10^{-6}$
bronze	$17{,}5 \cdot 10^{-6}$
laiton	$18{,}5 \cdot 10^{-6}$
alliages de magnésium et d'aluminium . . .	$24 \cdot 10^{-6}$

La valeur de t_i est choisie en fonction de la température de l'air de l'atelier.

Le coefficient K varie suivant les facteurs susmentionnés de 1,2 à 1,6.

Les pièces sont échauffées dans des bains d'eau ou d'huile, aux chalumeaux à gaz, par des courants d'induction ou des réchauffeurs électriques. L'opération peut être réalisée, notamment, avec des spirales électriques portatives qu'on introduit dans le trou de façon à assurer des jeux de 20 à 40 mm. L'échauffement des pièces à en-

combrement important demande beaucoup de temps et parfois la conduite de l'opération est très malaisée; on recourt alors au refroidissement des pièces mâles.

L'opération se fait dans de l'alcool ou de l'acétone préalablement refroidis à l'aide de la glace sèche (anhydride carbonique solide); un tel refroidissement peut être poussé jusqu'à —75°. Un réfrigérateur à ammoniaque permet de pousser le refroidissement jusqu'à —120°. L'air, l'oxygène ou l'azote liquide sont susceptibles de refroidir les pièces jusqu'à —180 ou —190°.

Dans les réfrigérateurs spéciaux la pièce est placée soit directement dans l'agent réfrigérant, soit dans un cylindre intérieur baigné par le liquide réfrigérant.

Les opérateurs chargés de la réalisation de l'assemblage par refroidissement dans des gaz liquéfiés doivent être informés sur les règles à observer lors de l'exécution de tels travaux, sur les effets nocifs pour la peau de l'homme produits par le milieu réfrigérant, et sur la possibilité d'une explosion au cas où les réservoirs de gaz liquéfiés sont trop bien fermés, ainsi que sur les propriétés explosives qu'acquièrent les tissus imbibés d'oxygène liquide.

L'assemblage par refroidissement de la pièce mâle est beaucoup plus rapide que celui par échauffement de la pièce femelle.

Pour calculer la température de refroidissement on emploie la même formule (103). La valeur obtenue pour t_f est alors négative car le coefficient de dilatation linéaire α est négatif lui aussi. Il faut également retenir que pendant le refroidissement les valeurs du coefficient sont inférieures à celles enregistrées pendant l'échauffement. Lors du refroidissement, le coefficient α acquiert notamment les valeurs suivantes:

Matériau	α
acier et fonte	$-8{,}5\cdot10^{-6}$
cuivre	$-14\cdot10^{-6}$
bronze	$-15\cdot10^{-6}$
laiton	$-16\cdot10^{-6}$
alliages de magnésium et d'aluminium	$-21\cdot10^{-6}$

Lorsque le serrage imposé est supérieur au retrait de la pièce mâle produit par le refroidissement, on recourt à un échauffement supplémentaire de la pièce femelle. Dans plusieurs cas l'application de cette méthode peut s'avérer avantageuse.

Si la surface de contact de deux et, plus rarement, de plusieurs pièces forme un plan, leur assemblage peut être réalisé à l'aide des attaches, c'est-à-dire de pièces auxiliaires en forme de plaques (fig. 155) ou de bagues, utilisées en guise d'éléments de serrage.

Pour réaliser l'assemblage, les éléments de serrage sont échauffés. La température opératoire est définie suivant la formule (103):

a) pour les plaques

$$t_f > \left(\frac{L_p - L_{pl}}{\alpha L_{pl}} + t_i\right) K,$$

où L_p est la dimension entre les saillies des pièces conjuguées; L_{pl}, la dimension entre les saillies de la plaque;

b) pour les bagues

$$t_f > \left(\frac{D_p - D_b}{\alpha D_b} + t_i\right) K,$$

où D_p est le diamètre de la saillie circulaire des pièces conjuguées; D_b, le diamètre de la bague de serrage; les dimensions L_{pl} et D_b sont définies en fonction du serrage imposé.

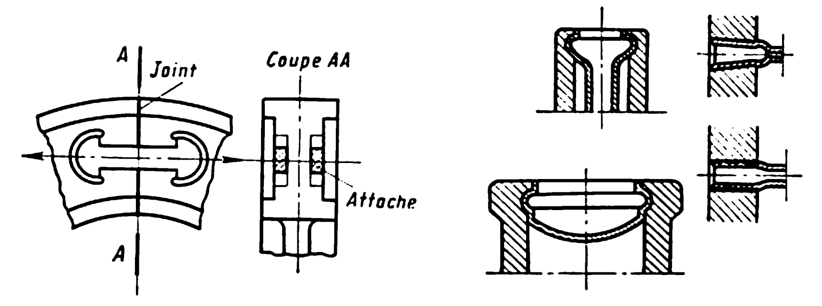


Fig. 155. Assemblage par attaches sous forme de plaques

Fig. 156. Assemblages types réalisés par sertissage

Le *sertissage* s'emploie pour l'exécution des assemblages hermétiques réalisés généralement par augmentation de la dimension diamétrale de la pièce mâle; cet effet s'obtient grâce à la pression exercée par un outil spécial qui s'appelle sertissoir. La figure 156 représente certains assemblages types réalisés par sertissage. La figure 157 schématise l'exécution de cette opération pour un siège de soupape, alors que la figure 158 donne une coupe de sertissoir planétaire.

Le *rivetage* est un mode opératoire qui permet d'assembler certaines constructions sollicitées par des températures élevées et susceptibles de corrosion, ainsi que supportant des charges vibratoires et dynamiques importantes. L'essor du soudage réduit de plus en plus l'application de l'assemblage par rivets.

Avant de s'attaquer au rivetage, les pièces doivent être assemblées à l'aide des boulons ou des broches pour que les trous coïncident exactement pendant l'opération. Pour réduire graduellement le défaut de position des trous dans les pièces à assembler, le

boulonnage s'effectue à partir du milieu vers les bords. Les boulons d'assemblage s'emploient pour 25 à 30 % des trous. Pour prévenir un déplacement éventuel en rivetage, une partie des trous (20 à 25 % du nombre des trous boulonnés) reçoit des broches coniques. Après avoir assuré ainsi la coïncidence des trous, les avoir vérifiés au calibre et effectué au besoin leur alésage, on aborde l'exécution du rivetage.

Pour mécaniser le rivetage on met en œuvre des marteaux pneumatiques ou électriques, des presses et des machines fixes. La figure 159 représente une riveuse oléopneumatique pour la pose des rivets de duralumin.

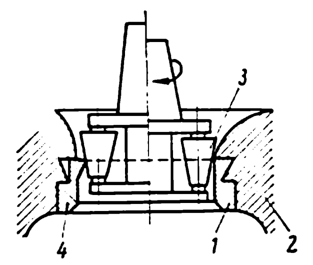


Fig. 157. Schéma de sertissage d'un siège de soupape :
1 — élément du siège en fin d'opération ; 2 — pièce de base ; 3 — rouleaux coniques du sertissoir ; 4 — élément du siège à replier par sertissage au début de l'opération

C'est une presse qui permet de riveter dans les conditions d'un accès difficile tout en augmentant jusqu'à 5 fois la productivité par rapport aux marteaux pneumatiques usuels. La presse autorise le rivetage des paquets d'une épaisseur différente (jusqu'à 15 mm) sans réglage supplémentaire. Elle fonctionne à partir d'un multiplicateur oléopneumatique ПТА-8 qui transforme la pression de l'air (4 à 5 at) en une pression de 300 at.

Le corps *1* de la riveuse comporte des canaux par lesquels l'huile est refoulée vers le cylindre pour pousser en haut le piston *2*. Ce

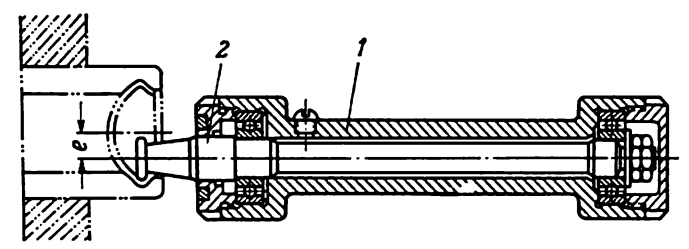


Fig. 158. Sertissoir planétaire :
1 — corps animé d'un mouvement planétaire suivant une circonférence de rayon *e* ; 2 — tige de sertissage

dernier agit sur le support *3* qui fait tourner le levier *4* ; le plongeur *5* effectue alors la course de travail. La course de retour du plongeur se produit lorsque l'huile est refoulée dans la deuxième enceinte du cylindre. Pour actionner la presse, il faut appuyer sur le bouton *6*.

La riveuse pèse 8,5 kg, porte 320 coups par minute ; l'effort maximal qu'elle fournit est de 9000 kg ; la flèche de l'étrier est de 55 mm.

Le *soudage* est un mode opératoire qui connaît une extension toujours plus grande dans les industries mécaniques actuelles. Il permet d'enregistrer une économie importante de matériaux et parfois de travail.

Dans un atelier de mécanique générale, les machines de soudage à l'arc font généralement partie de la chaîne commune.

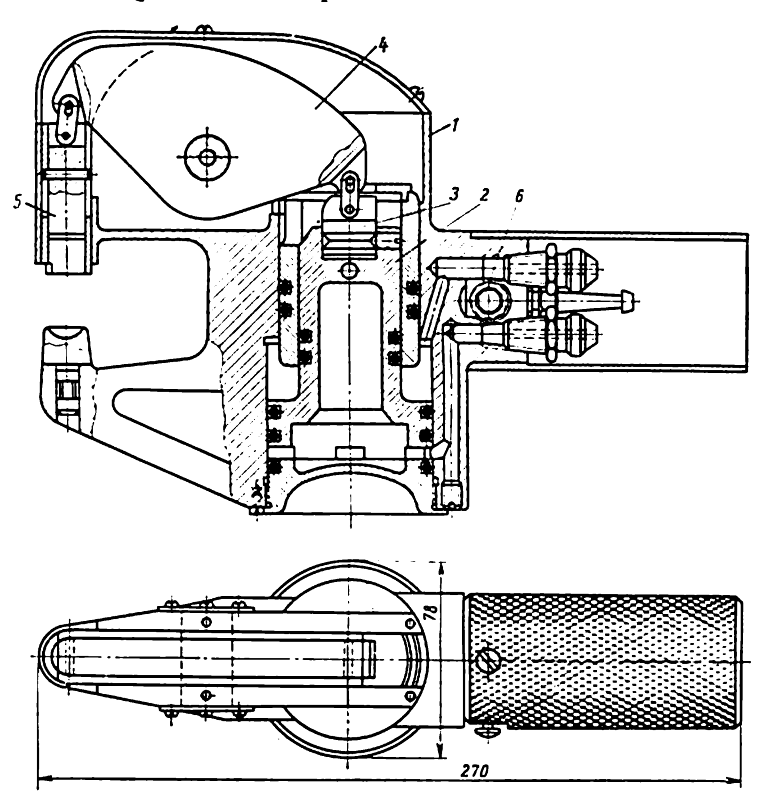


Fig. 159. Presse oléopneumatique portative pour l'assemblage des tôles minces: 1 — corps; 2 — piston; 3 — support; 4 — levier; 5 — plongeur; 6 — bouton de mise en marche

Le soudage à l'arc électrique automatique et semi-automatique est très usité dans l'industrie soviétique. Le soudage descendant avec flux séparé est un procédé très prometteur d'assemblage des pièces métalliques épaisses (60 à 250 mm et plus). Le soudage à l'arc manuel s'emploie pour l'exécution de petits cordons, lorsque l'automatisation ne présente aucun avantage économique, ainsi que dans le cas des travaux unitaires.

Le soudage électrique en bout est mis en œuvre pour assembler des pièces dont les métaux ou les alliages constitutifs sont différents (assemblage d'un acier refractaire avec un acier de construction, par exemple, lors de l'exécution des soupapes de moteurs), pour la fabrication des pièces à contour fermé (jantes des roues, couronnes dentées), des ensembles complexes à partir d'éléments simples (profilés, pièces forgées), pour l'allongement des éléments de construction (serpentins tubulaires dans la construction des chaudières).

Le soudage par points sert pour réaliser des assemblages par recouvrement de tôles et de profilés en acier et en métaux non ferreux, pour la fabrication des ensembles soudés et estampés, ainsi que des constructions à squelette comportant des revêtements de tôles.

Le soudage en relief et en T s'emploie pour réaliser de petites pièces en acier à bas carbone et trouve notamment une large application dans l'industrie automobile. Le soudage à la molette sert pour fabriquer des réservoirs, des emballages métalliques, etc.

Le soudage au gaz est caractérisé par son universalité, c'est-à-dire par son aptitude à s'employer pour l'exécution des travaux les plus variés réalisés avec le même équipement peu complexe, et par ses avantages pour l'assemblage des pièces en fonte et en métaux non ferreux. Le soudage au gaz par pression est prévu pour la liaison des tubes, ainsi que pour l'exécution des ensembles constitués de pièces pleines.

Le *brasage* des métaux est un mode opératoire qui consiste à déposer dans le jeu entre les pièces à assembler échauffées et qui restent à l'état solide une brasure fondue qui mouille leurs surfaces et solidarise les pièces une fois le refroidissement et la solidification achevés. La pose de la brasure au fer à souder est un procédé à productivité très faible.

Pour l'accroître on recourt à des fours spéciaux. Dans ce cas l'opération consiste à assembler les pièces décapées au préalable de manière à rendre possible la pose au droit du joint d'une brasure sous forme de fil, de bande de feuille métallique, de pâte, de dépôt électrolytique, etc. L'ensemble est placé ensuite dans un four électrique, où il est échauffé jusqu'à la température de fusion de la brasure, qui doit être inférieure à celle de fusion du métal des pièces assemblées. Le bon mouillage assuré par la brasure fondue portée à la température de fusion des surfaces des pièces assemblées et le phénomène de capillarité font que la brasure remplit le jeu entre les pièces et se mélange avec le métal fondu de leurs bords en formant après la solidification un alliage plus résistant que la brasure elle-même. Ainsi, dans le cas du brasage des pièces en acier avec une brasure à cuivre la résistance du cuivre est de 14 kg/mm^2, celle de l'acier, de 23 kg/mm^2 et celle du cordon, de 20 kg/mm^2.

Les fours à braser ont des chambres de chauffe et de refroidissement. L'opération se produit dans un milieu neutre qui préserve les pièces contre la formation des oxydes à leur surface en améliorant ainsi le mouillage. On emploie des fours à chambre, à chaîne ou mécaniques avec sole à rouleaux. Le mode de brasage exposé s'opère généralement dans des fours électriques.

Le brasage par immersion dans un bain est un procédé productif assurant une bonne qualité. La charge du bain est constituée alors de brasure dans laquelle on plonge l'objet à assembler couvert au droit du joint par du fondant. Après 5 à 20 s de maintien dans le bain, on retire l'objet en laissant s'écouler l'excédent de brasure. Il en est de même pour l'utilisation de la brasure à cuivre et à zinc (pour le brasage des cadres de bicyclettes, par exemple). Dans ce procédé, le fondant est maintenu à l'état de fusion à la surface du bain. Les surfaces ne devant pas subir le brasage sont recouvertes d'une couche protectrice de graphite.

Le brasage solide se fait dans des bains salins constitués d'un mélange de chlorures de potassium et de baryum. Les ensembles à braser avec des joints de brasure sont plongés dans le bain. Le sel fondu dissout les oxydes, améliore le mouillage assuré par la brasure en train de fondre au droit de l'assemblage et, une fois l'opération terminée, protège contre l'oxydation à l'air l'ensemble extrait du bain. Cette opération peut s'effectuer dans des fours de traitement à sel C-35 ou C-75 dont la productivité est respectivement de 40 et de 70 kg d'ensembles brasés par heure.

Ces modes de brasage peuvent être mécanisés en recourant à des installations spécialement prévues pour immerger et maintenir dans les bains les ensembles préparés pour le brasage ; à cet effet on emploie des transporteurs spéciaux qui passent en portant ces ensembles entre les spires d'un solénoïde (lors d'une chauffe par induction), etc. Il existe également des machines prévues uniquement pour le brasage des pièces d'un type défini. Ainsi, toutes les opérations de la gamme de fabrication des emballages à partir d'une bande métallique sont automatisées, y compris le brasage des cordons.

Le *collage au carbinol* s'emploie pour réaliser certains assemblages fixes.

Le carbinol peut s'employer pour assembler des métaux, des matières plastiques, du verre, de la porcelaine, du marbre, du mica, de l'ébonite, de la fibre et leurs combinaisons. A des températures inférieures à 60°, les assemblages réalisés au carbinol assurent une résistance suffisante (charge de rupture 230 à 240 kg/cm^2), qui diminue à des températures plus grandes ; une fois le cap de 70° dépassé, le carbinol commence à s'amollir ; un échauffement poussé à 90 ou 95° pendant 9 h réduit de 1,5 à 2 fois sa résistance au cisaillement. Cet inconvénient limite le domaine d'application du carbinol.

Le carbinol est préparé directement avant l'utilisation. La durée de l'intervalle entre l'introduction du catalyseur et l'application de la colle varie de 30 à 60 mn, suivant la viscosité de la solution de carbinol. Le catalyseur est constitué d'une solution de 2 à 3 % de peroxyde de benzoyle.

Le carbinol est porté sur les surfaces à coller avec une baguette en verre, après quoi ces surfaces sont appliquées l'une contre l'autre, en observant la position relative imposée des éléments assemblés avec un matériel de contrôle ; ensuite, les pièces bien serrées sèchent pendant 1 à 4 jours. Les surfaces à assembler doivent être bien nettoyées, dégraisées et séchées. Si le collage est appliqué à des pièces présentant un bel état de surface, les surfaces à coller doivent être rendues rugueuses avec une toile émeri ou une lime, puis soigneusement nettoyées à l'acétone.

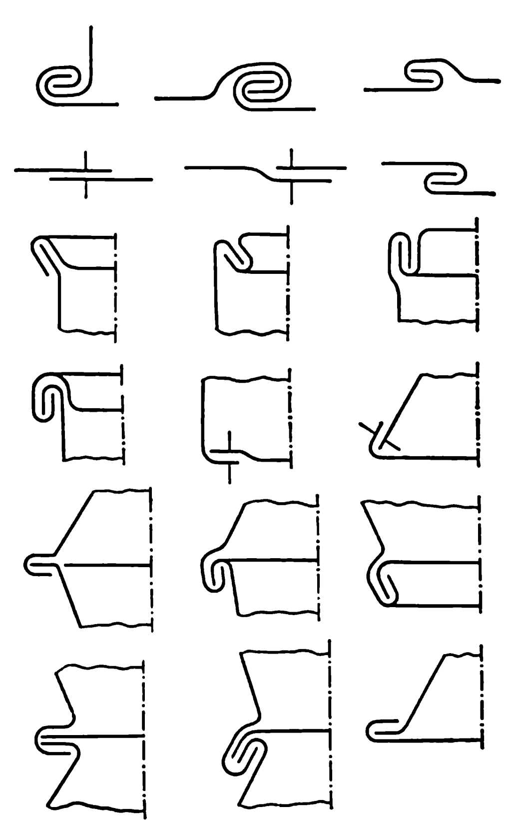


Fig. 160. Types d'agrafage rectiligne et circulaire

En pratique, le collage au carbinol s'emploie dans la fabrication des calibres et autres matériels de contrôle et dans certaines branches de l'industrie des appareils ; son utilisation en construction mécanique est très limitée.

L'*assemblage des pièces par cambrage à froid* est mis en œuvre non seulement pour le travail des tôles estampées, mais également en combinant les tôles avec des pièces fabriquées par d'autres procédés, par usinage ou par estampage volumique, par exemple.

La figure 160 représente les modes de réalisation des agrafes rectilignes et circulaires ; certaines variantes n'assurent que l'étanchéisation, d'autres combinent l'étanchéité à la rigidité et la résistance de l'assemblage : certains assemblages font appel au soudage par points

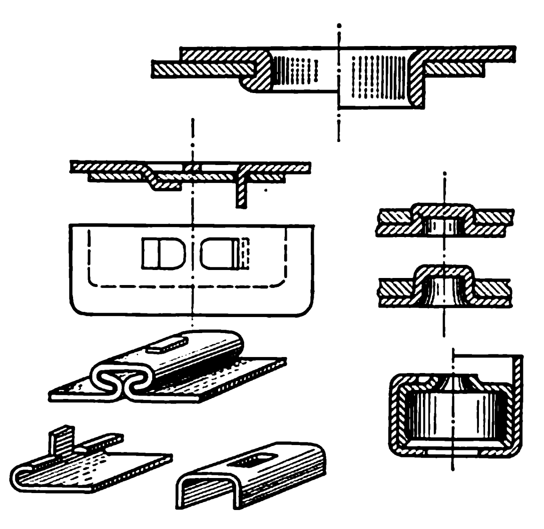


Fig. 161. Assemblage de pièces tôlées par pliage, bordage et formage par estampage

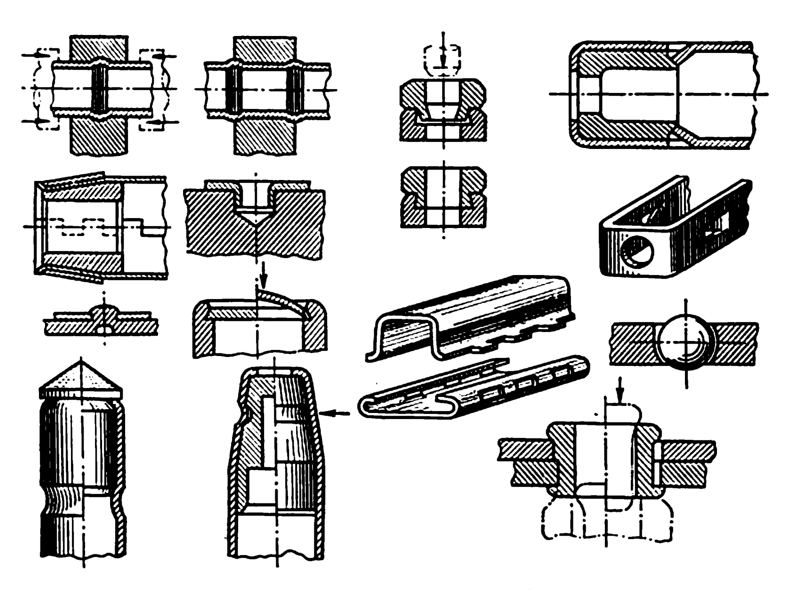


Fig. 162. Assemblage de pièces tôlées avec des pièces usinées sur des machines-outils

ou au rivetage. La figure 161 donne des exemples d'assemblage par pliage, bordage et formage. La figure 162 illustre l'assemblage de

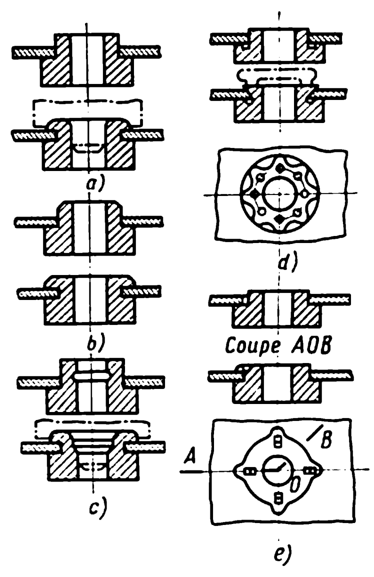


Fig. 163. Assemblage de bagues exécutées sur des machines-outils avec des pièces tôlées

pièces estampées à partir de tôles avec celles usinées sur des machines-outils. La figure 163 représente l'assemblage de bagues façonnées sur des machines-outils avec des pièces exécutées à partir de tôles, prévoyant la déformation du matériau soit suivant tout le contour conjugué, soit suivant un contour partiel (assemblages *d* et *e*). La figure 164 donne des exemples d'assemblage des pièces cylindriques avec des pièces tôlées.

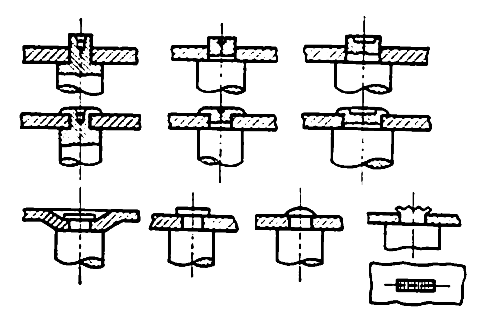


Fig. 164. Assemblage de pièces tôlées avec des pièces cylindriques

Le *montage des assemblages mobiles démontables et permanents.* Les assemblages mobiles sont réalisés suivant des ajustements avec jeu : glissant juste, glissants, tournants, libres et très libres ; le jeu nul qui est un jeu minimal est réalisé par l'ajustement glissant juste lorsque l'alésage à la cote limite inférieure est combiné à l'arbre dont la cote limite est supérieure.

Les jeux qui assurent la mobilité de l'assemblage et autres spécifications techniques sont imposés lors de l'établissement du projet des ensembles et des mécanismes. La tâche de l'agent de méthodes consiste à rédiger la gamme de fabrication de manière à observer les tolérances sur les cotes ainsi que les défauts de forme et les écarts de position des surfaces imposés par les dessins d'exécution. Il convient de retenir, notamment, que le but de l'ajustage est non seulement d'assurer l'ajustement requis, mais encore la précision géométrique dans le cadre de la tolérance imposée. Or, lors du grattage des coussinets des paliers il est facile de compromettre la cylindricité du trou, par exemple, qui est une des conditions assurant un fonctionnement normal des paliers ; le défaut de cylindricité perturbe l'allure du frottement hydrodynamique dans la conjugaison de l'arbre avec le coussinet, amorçant ainsi une usure accélérée des pièces conjuguées.

L'utilisation des assemblages mobiles permanents est très restreinte. A titre d'exemple d'un tel assemblage on peut citer les roulements permanents.

Les *particularités du montage des pièces en matières plastiques.* Les assemblages démontables des pièces en matières plastiques ne se distinguent pas, au fond, de ceux des pièces métalliques, mais le montage des pièces en matières plastiques doit s'opérer en observant les règles suivantes :

les jeux entre les boulons métalliques et les parois des trous dans les pièces en matières plastiques doivent être prévus compte tenu des coefficients de dilatation linéaire différents ;

le serrage des boulons et des vis doit se faire avec des clés compensées qui excluent l'application d'une pression supérieure à la charge de rupture de la matière plastique ; l'emploi des rondelles métalliques sous les têtes des boulons et des vis et sous les écrous est de rigueur ;

lors de la pose à force des pièces en matières plastiques sur des tiges métalliques, utiliser des marteaux en bois (maillets), éliminer les ajustements avec serrage ; là où il est indispensable, les remplacer par un filetage.

Les assemblages permanents des pièces en matières plastiques sont réalisés par rivetage, soudage ou collage.

Le rivetage s'emploie pour les tôles en bois-delta, le textolite de verre, le textolite et la fibre. Lors du rivetage, des rondelles sous les têtes des rivets sont de rigueur.

Le soudage peut être appliqué à l'assemblage des pièces en verre organique et en plastique vinylique. Le soudage du verre organique est fondé sur le principe de la fusion des surfaces soudées ; il s'effectue sans addition dont l'emploi n'est pas à exclure généralement.

Avant de procéder au soudage, les pièces sont fraisées pour réaliser un assemblage « à flûte », puis elles sont décapées au droit du soudage avec du dichloréthane (liquide incolore, bon dissolvant pour les graisses et les résines). De 5 à 10 mn après cette opération, les ébauches sont serrées au droit de l'assemblage et placées sous une presse entre des cales lisses en acier portées au préalable à 60 ou 80°. Les plaques de la presse sont progressivement serrées, alors que la température des pièces est poussée graduellement jusqu'à 125 ou 135° à l'aide de réchauffeurs électriques. Le maintien à cette température et à la pression spécifique de 5 à 10 kg/cm² dure de 8 à 10 mn à raison d'environ 1 mn par 1 mm d'épaisseur du matériau. Ensuite, sans changer la pression, on procède au refroidissement jusqu'à la température de 30 à 40°, obtenue en faisant passer de l'eau dans les tubes ; une fois le refroidissement terminé, la pression est supprimée.

Le cordon de soudure doit être transparent sur toute la longueur de l'assemblage. S'il y a des aires opaques, on reprend le soudage.

Le soudage du plastique vinylique est effectué avec du fil de polychlorure de vinyle plastifié d'un diamètre de 2 à 3,5 mm. La matière au droit du soudage est fondue par l'air qui passe par le pistolet muni d'un réchauffeur électrique de 300 à 400 W (sous une tension de 24 à 65 V) et qui porte l'air à une température de 200 à 225°. La pression de l'air est de 0,5 at, et son débit est d'environ 900 l/h. Le fil à souder est amené perpendiculairement au cordon faiblement poussé à la main par le soudeur. La résistance de la soudure vaut 0,6 à 0,8 de la résistance du matériau soudé.

Le collage est le mode d'assemblage principal des matières plastiques entre elles et avec du métal. L'assemblage à la colle est plus résistant et plus économique que le rivetage. Les surfaces à coller doivent être rugueuses et décapées, et surtout dégraissées.

Le collage des métaux avec des matières plastiques s'effectue avec des colles universelles БФ-2 et БФ-4 constituées de solutions de résines spéciales, ainsi qu'avec du carbinol. Pour le collage des matières plastiques stratifiées on utilise également des colles à base de résine ВИАМ-Б3 dont l'application n'impose pas des températures élevées. Les colles БФ-2 et БФ-4 s'emploient à la température de 140 à 150°, sous une pression de 5 à 10 kg/cm² et avec un maintien de 30 à 60 mn ; le carbinol, à la température de 20 à 45°, sous une pression de 0,2 à 5 kg/cm², en fonction de l'épaisseur des matériaux, et avec un maintien de 12 à 24 heures.

CHAPITRE IV

Calcul de la surépaisseur d'usinage et cotation de fabrication des ébauches

§ 1. Calcul des surépaisseurs en usinage par le procédé d'obtention automatique des cotes

Notion de surépaisseur d'usinage. Intérêt technique et économique des valeurs des surépaisseurs. Surépaisseurs intermédiaires et totales. Surépaisseurs symétriques et asymétriques. Procédés statistique et analytique du balancement des cotes. Facteurs définissant la surépaisseur minimale. Formules de calcul des surépaisseurs. Calcul des cotes de fabrication relatives aux sous-phases.

Une série de reprises d'usinage progressif permet d'obtenir à partir des pièces brutes des formes, dimensions et états de surface imposés par le dessin, dans les limites des tolérances qu'il prévoit.

Chaque reprise consiste à enlever de la surface de la pièce une couche de métal sous forme de copeau, en modifiant ainsi les dimensions de l'ébauche. La couche de métal enlevée par l'usinage s'appelle *surépaisseur d'usinage.*

L'établissement d'une surépaisseur excessive conduit parfois à l'élimination des couches superficielles les plus résistantes à l'usure. Une surépaisseur excessive implique, par ailleurs, l'emploi de reprises supplémentaires, augmente la quantité de travail, le débit de métal, d'énergie électrique, la consommation des outils élevant ainsi le prix de revient des pièces.

La diminution des surépaisseurs d'usinage est un des moyens permettant de faire une économie de métal, de réduire la quantité de travail nécessitée par l'usinage. Mais si les surépaisseurs d'usinage sont insuffisantes, elles n'assurent pas l'élimination des couches superficielles défectueuses et l'obtention d'une précision et d'un état de surface imposés, rendant parfois impossible l'utilisation des outils par suite de l'existence d'une croûte trop dure ou de pailles. Les surépaisseurs insuffisantes sont susceptibles d'augmenter le volume de rebut, en élevant ainsi, évidemment, le prix de revient des produits fabriqués.

Le choix de tolérances trop larges complique nettement l'exécution des gammes d'usinage des ébauches sur des machines réglées à l'avance ; on est obligé de faire appel au triage des ébauches suivant les dimensions, et la précision d'usinage sur des montages se trouve dégradée.

L'établissement des valeurs optimales des surépaisseurs et des tolérances de fabrication sur les cotes pour toutes les reprises est une des tâches essentielles sur le plan technique et économique.

On distingue les surépaisseurs d'usinage intermédiaires et totales.

On donne le nom de *surépaisseur intermédiaire* à la couche de matériau nécessaire pour la réalisation d'une reprise. La surépaisseur intermédiaire d'une surface élémentaire considérée est la différence entre la cote réalisée par la reprise antérieure et celle que l'on doit obtenir par l'exécution de la reprise en cours.

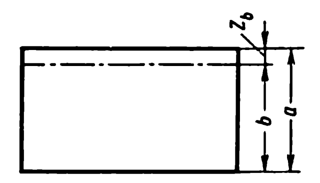


Fig. 165. Surépaisseur d'usinage d'une surface extérieure

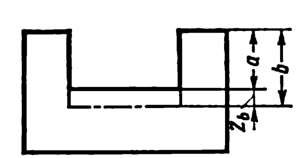


Fig. 166. Surépaisseur d'usinage d'une surface intérieure

Pour les surfaces extérieures de la pièce (fig. 165)

$$a-b=z_b; \tag{104}$$

pour ses surfaces intérieures (fig. 166)

$$a-b=-z_b;$$

en inversant dans ce dernier cas les signes, on obtient

$$b-a=z_b, \tag{105}$$

où z_b est la surépaisseur imposée à la reprise considérée;
a, la cote réalisée par la reprise antérieure;
b, la cote à obtenir par la reprise en cours.

La *surépaisseur totale* est l'épaisseur du matériau à enlever pour respecter l'ensemble des prescriptions établies par la gamme d'usinage, c'est-à-dire pour effectuer toutes les opérations d'usinage que doit subir la surface élémentaire considérée, depuis son état brut jusqu'à sa finition; la surépaisseur totale est la différence entre les cotes de la pièce brute et de la pièce finie.

Pour les surfaces extérieures

$$a_{éb}-a_p=z_t; \tag{106}$$

pour les surfaces intérieures

$$a_p-a_{éb}=z_t, \tag{107}$$

où z_t est la surépaisseur totale;
$a_{éb}$, la cote de l'ébauche brute;
a_p, la cote de la pièce finie.

Il est évident que la surépaisseur totale est égale à la somme des surépaisseurs intermédiaires de toutes les reprises de la gamme

d'usinage depuis l'ébauche brute jusqu'à la pièce finie :

$$z_t = \sum_{i=1}^{n} z_i, \qquad (108)$$

où n est le nombre de reprises.

On distingue les surépaisseurs d'usinage symétriques et asymétriques.

Les *surépaisseurs symétriques* s'emploient pour l'exécution des surfaces de révolution extérieures et intérieures (fig. 167 et 168),

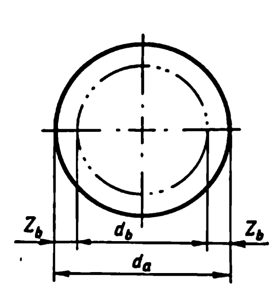


Fig. 167. Surépaisseur d'usinage symétrique d'une surface de révolution

Fig. 168. Surépaisseur d'usinage symétrique d'un trou

ainsi que pour l'usinage parallèle des plans opposés :

$$z_b = \frac{d_a - d_b}{2}$$

ou

$$2z_b = d_a - d_b \text{ et } 2z_b = l_a - l_b \qquad (109)$$

pour les surfaces extérieures ;

$$2z_b = d_b - d_a \text{ et } 2z_b = l_b - l_a \qquad (110)$$

pour les surfaces intérieures,

où $2z_b$ est la surépaisseur par diamètre ou par deux plans opposés ;

d_a et d_b, les diamètres des surfaces lors des reprises antérieures (d_a) et en cours (d_b) ;

l_a et l_b, les cotes entre les plans lors des reprises antérieures (l_a) et en cours (l_b).

Les surépaisseurs asymétriques s'emploient lorsque les plans opposés sont façonnés indépendamment l'un de l'autre (fig. 169)

$$z_{b_1} = a_1 - b_1; \qquad z_{b_2} = a_2 - b_2.$$

La surépaisseur unilatérale est un cas particulier du balancement asymétrique des surépaisseurs lorsqu'un des plans n'est pas usiné du tout.

En construction mécanique l'établissement des surépaisseurs d'usinage se fait surtout par le *procédé statistique*. La surépaisseur est alors établie pour toute la gamme d'usinage sans calculer la valeur de chacun de ses éléments; la valeur de ces éléments est établie sur la base des surépaisseurs réelles appliquées lors de l'usinage des ébauches de pièces analogues. Ainsi, pour les pièces de fonderie, les surépaisseurs sont désignées indépendamment de la gamme d'usinage des surfaces élémentaires.

Fig. 169. Surépaisseurs d'usinage asymétriques des surfaces extérieures

Les valeurs des surépaisseurs établies statistiquement pour la finition et le parachèvement ne tiennent pas compte des modes de positionnement et d'autres conditions concernant l'exécution des opérations.

Le plus souvent, les valeurs statistiques sont exagérées car elles ne prennent pas en considération les particularités des gammes d'usinage et correspondent aux conditions d'usinage réclamant une surépaisseur maximale.

La méthode de la construction des abaques qui donnent à l'agent de méthodes une valeur toute prête de la surépaisseur, l'incite à procéder d'une manière mécanique sans rechercher par analyse de l'exécution des opérations les moyens de réduire les surépaisseurs. Il fallait donc établir sur une base scientifique le système de calcul des surépaisseurs; aussi, dès 1935, on voit apparaître en U.R.S.S. des ouvrages de technologie de la construction mécanique, qui font part de l'analyse des facteurs régissant la valeur de la surépaisseur; par la suite on établit des méthodes de calcul des surépaisseurs. En 1952, dans les ouvrages de référence, les normes statistiques expérimentales sont pour la première fois remplacées par le calcul des surépaisseurs, et, en 1953, la *méthode analytique de calcul* des surépaisseurs est rendue publique; cette méthode est fondée sur l'étude des facteurs qui influent sur la surépaisseur, dont la valeur est définie par un calcul différencié des éléments de la surépaisseur.

Lors de l'exécution des lots d'ébauches analogues sur des machines-outils réglées à l'avance, la variation des cotes dans les limites de la tolérance fait que les surépaisseurs d'usinage réelles varient elles aussi. Pour respecter la cote b d'une pièce dont la cote limite

inférieure est a_{min}, sa supéraisseur minimale doit être $z_{b_{min}}$, et d'une pièce dont la cote limite maximale est a_{max}, sa surépaisseur maximale doit être $z_{b_{max}}$ (fig. 170). Les surépaisseurs réelles des ébauches dont les cotes se situent entre a_{min} et a_{max} ne sont pas inférieures à $z_{b_{min}}$ et supérieures à $z_{b_{max}}$. Lors de l'exécution des surfaces

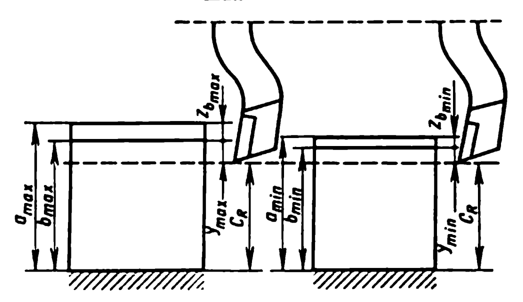


Fig. 170. Surépaisseurs d'usinage maximale et minimale d'exécution d'une surface extérieure:

Y_{max} et Y_{min} — valeurs des refoulements; C_R — cote de mise en place

extérieures sur une machine-outil réglée à l'avance, les cotes à respecter sont b_{max} pour a_{max} et $z_{b_{max}}$, et b_{min} pour a_{min} et $z_{b_{min}}$ [1]. Dans ces conditions

$$z_{b_{min}} = a_{min} - b_{min}; \tag{111}$$

$$z_{b_{max}} = a_{max} - b_{max}. \tag{112}$$

En remplaçant a_{max} par $a_{min} + \delta_a$ et b_{max} par $b_{min} + \delta_b$, on obtient

$$z_{b_{max}} = a_{min} + \delta_a - b_{min} - \delta_b$$

ou

$$z_{b_{max}} = z_{b_{min}} + \delta_a - \delta_b. \tag{113}$$

Pour la surépaisseur nominale $z_{b_{nom}}$, il vient

$$z_{b_{nom}} = a_{nom} - b_{nom}; \tag{114}$$

en remplaçant a_{nom} par $a_{min} + H_a$ et b_{nom} par $b_{min} + H_b$, on obtient

$$z_{b_{nom}} = a_{min} + H_a - b_{min} - H_b$$

ou

$$z_{b_{nom}} = z_{b_{min}} + H_a - H_b, \tag{115}$$

[1] Voir chapitre II, § 3.

où H_a et H_b sont les écarts inférieurs des cotes réalisées par les reprises antérieure (H_a) et en cours (H_b).

On obtient d'une façon analogue:
pour des surfaces intérieures, les surépaisseurs étant asymétriques:

$$z_{b_{min}} = b_{max} - a_{max};\qquad (116)$$

$$z_{b_{max}} = b_{min} - a_{min};\qquad (117)$$

$$z_{b_{max}} = z_{b_{min}} + \delta_a - \delta_b;\qquad (118)$$

$$z_{b_{nom}} = b_{nom} - a_{nom};\qquad (119)$$

$$z_{b_{nom}} = z_{b_{min}} + B_a - B_b;\qquad (120)$$

pour des surfaces extérieures, les surépaisseurs étant symétriques:

$$2z_{b_{min}} = D_{a_{min}} - D_{b_{min}};\qquad (121)$$

$$2z_{b_{max}} = D_{a_{max}} - D_{b_{max}};\qquad (122)$$

$$2z_{b_{max}} = 2z_{b_{min}} + \delta_{D_a} - \delta_{D_b};\qquad (123)$$

$$2z_{b_{nom}} = D_{a_{nom}} - D_{b_{nom}};\qquad (124)$$

$$2z_{b_{nom}} = 2z_{b_{min}} + H_{D_a} - H_{D_b};\qquad (125)$$

pour des surfaces intérieures, les surépaisseurs étant symétriques (fig. 171):

$$2z_{b_{min}} = D_{b_{max}} - D_{a_{max}};\qquad (126)$$

$$2z_{b_{max}} = D_{b_{min}} - D_{a_{min}};\qquad (127)$$

$$2z_{b_{max}} = D_{b_{max}} - \delta_{D_b} - D_{a_{max}} + \delta_{D_a}$$

ou

$$2z_{b_{max}} = 2z_{b_{min}} + \delta_{D_a} - \delta_{D_b},\qquad (128)$$

alors que pour les surépaisseurs nominales

$$2z_{b_{nom}} = D_{b_{nom}} - D_{a_{nom}},\qquad (129)$$

c'est-à-dire

$$2z_{b_{nom}} = D_{b_{max}} - B_{D_b} - D_{a_{max}} + B_{D_a}$$

ou

$$2z_{b_{nom}} = 2z_{b_{min}} + B_{D_a} - B_{D_b},\qquad (130)$$

où B_{D_b} et B_{D_a} sont les écarts supérieurs des diamètres réalisés par les reprises en cours (B_{D_b}) et antérieure (B_{D_a}).

Les cotes à respecter en cours d'usinage sont: $a_{b_{min}}$ pour $d_{a_{min}}$ et $z_{b_{max}}$; $d_{b_{max}}$ pour $d_{a_{max}}$ et $z_{b_{min}}$. La relation susmentionnée

entre les cotes, les surépaisseurs et les tolérances est définie par les fléchissements élastiques des éléments du système technologique produits en usinage des ébauches sur des machines-outils réglées à l'avance.

La tolérance sur la surépaisseur δ_z est déterminée comme la différence entre les surépaisseurs maximale et minimale. Les formules (113) et (123) permettent de tirer

$$\delta_z = z_{b_{max}} - z_{b\,min} = \delta_a - \delta_b ; \tag{131}$$

$$\delta_z = 2z_{b_{max}} - 2z_{b_{min}} = \delta_{D_a} - \delta_{D_b} . \tag{132}$$

En abordant l'étude des facteurs qui régissent la valeur des surépaisseurs minimales, il faut rappeler que chaque ébauche est carac-

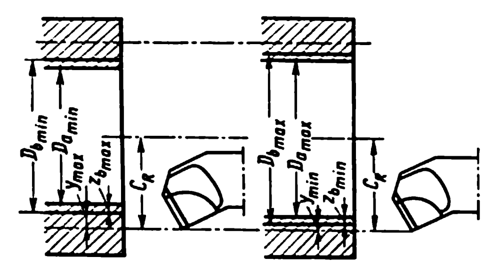


Fig. 171. Surépaisseurs d'usinage maximale et minimale d'exécution d'un trou : Y_{max} et Y_{min} — valeurs des refoulements ; C_R — cote de mise en place

térisée par sa précision et son état de surface déterminé par le mode d'exécution, de même que chaque reprise de la gamme d'usinage permet d'obtenir la précision requise et la qualité de surface définie.

Les surépaisseurs d'usinage sont établies de façon à corriger par l'exécution de la reprise en cours les défauts de l'ébauche résultant de l'exécution de la reprise antérieure.

La qualité de la surface des ébauches à un stade quelconque de leur usinage est caractérisée par les rugosités, l'état et la profondeur de la couche superficielle. Pour éviter dans la couche superficielle l'accumulation des écarts de l'état normal du métal de base, les rugosités et les défauts de la couche superficielle, produits par la reprise antérieure, doivent être corrigés par la reprise en cours.

Pourtant les calculs de la surépaisseur doivent tenir compte non pas de la profondeur totale de la couche superficielle mais seulement de sa partie défectueuse supérieure, sans attaquer la couche écrouie plus résistante à l'usure que les couches sous-jacentes et susceptible d'assurer un meilleur état de surface lors de la coupe dans cette zone (fig. 172 et 173).

Rappelons que la précision de l'ébauche et de son usinage ultérieur est définie, en plus des écarts des cotes imposées dans les limites de tolérances, par les défauts géometriques de forme et les écarts de position relative.

Les défauts géométriques des surfaces (ovalité, conicité, ensellement, tonneau, concavité, convexité, etc.) ne sont admissibles que dans les limites de la zone de tolérances sur la cote ; généralement, ils n'en constituent qu'une partie et de ce fait ne sont pas pris en considération dans le calcul des surépaisseurs.

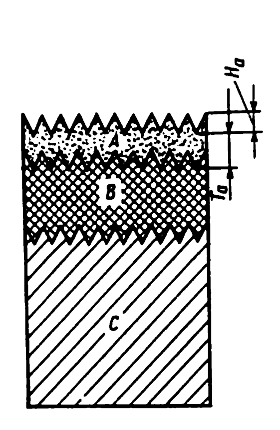


Fig. 172. Couche superficielle d'une surface extérieure en œuvre:

A — zone défectueuse à enlever ; *B* — zone non enlevée (écrouissage et zone de transition) ; *C* — structure de base ; H_a — rugosités ; T_a — défauts de la couche superficielle résultant de l'usinage antérieur

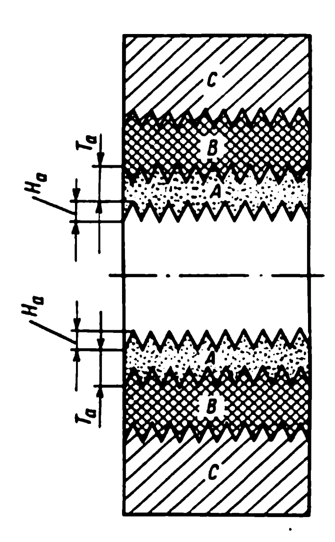


Fig. 173. Couche superficielle d'une surface intérieure en œuvre (trou) :

A — zone défectueuse à enlever ; *B* — zone non enlevée (écrouissage et zone de transition) ; *C* — structure de base ; H_a et T_a — voir fig. 172

Les écarts de position relative (flèche des axes, gauchissement des surfaces, écartement et défaut de parallélisme des axes, défaut de perpendicularité des axes et des surfaces, défaut de coaxialité des fusées d'arbres et des trous, excentricité des surfaces extérieures par rapport aux trous, etc.) ne sont pas liés à la tolérance sur la cote d'une surface élémentaire et jouent un rôle eux-mêmes. On en tient compte en établissant la surépaisseur minimale sous forme d'un terme d'addition ρ_a. Un défaut de positionnement, qui peut avoir lieu lors de l'exécution d'une reprise, peut provoquer un déplacement de l'ébauche et nécessiter ainsi l'augmentation de la surépaisseur

d'usinage. Ainsi, la surépaisseur d'usinage asymétrique minimale $z_{b_{min}}$ (fig. 174) doit inclure les défauts de la couche superficielle (hauteur des rugosités H_a et profondeur de la couche défectueuse superficielle T_a), la valeur totale des écarts de position ρ_a, produit par l'usinage antérieur, et le défaut de mise en place des ébauches lors de l'operation exécutée ε_m:

$$z_{b\min} = a_{\min} - b_{\min} = (H_a + T_a) + \rho_a + \varepsilon_m.$$

Dans le cas considéré (fig. 174), le défaut de mise en place ε_m est produit par l'affaissement de l'ébauche sous l'effet de la défor-

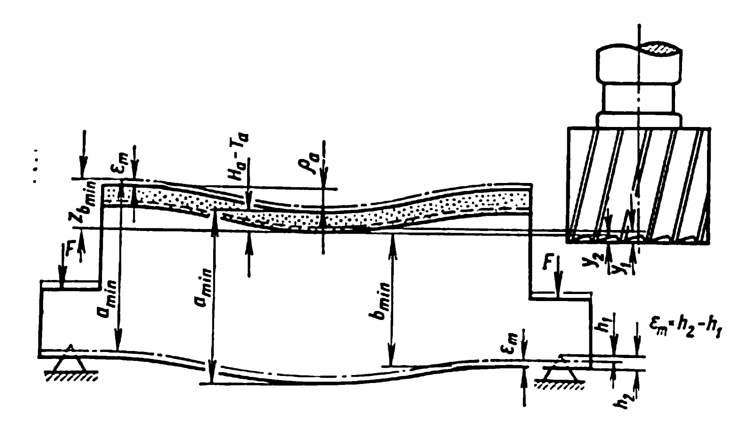


Fig. 174. Surépaisseur d'usinage asymétrique minimale d'exécution d'une surface extérieure:

Y_1 et Y_2 — valeurs des refoulements suivant l'axe de la broche ; h_1 et h_2 — valeurs de la déformation de la couche superficielle

mation de la couche superficielle de sa surface d'assise. Cette erreur de mise en place doit être compensée par une surépaisseur accrue.

Dans le cas d'une surépaisseur symétrique, il faut tenir compte toujours de mêmes défauts d'usinage antérieur et de mise en place relative à l'opération en cours. Ainsi, pour l'exécution d'un trou (fig. 175), on obtient 2 $z_{b_{min}}$ pour $d_{a_{max}}$ (voir fig. 171).

L'usinage antérieur du trou a défini les valeurs de H_a et T_a, ainsi que le décalage ρ_d et l'écartement $\rho_{éc}$ de l'axe du trou par rapport à l'axe de la surface extérieure. La somme des valeurs du décalage et de l'écartement de l'axe du trou ρ_a constitue le défaut de position produit par la reprise antérieure, lors du perçage du trou par exemple. Supposons que lors de l'ablocage d'une ébauche dans un mandrin à serrage concentrique, son axe se soit déplacé de l'axe de rotation

à la valeur ε_m. Alors,

$$\frac{d_{b_{max}}}{2} = (H_a + T_a) + \frac{d_{a_{max}}}{2} + |\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_m|.$$

donc

$$\frac{d_{b_{max}} - d_{a_{max}}}{2} = (H_a + T_a) + |\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_m| = z_{b_{min}}$$

ou

$$d_{b_{max}} - d_{a_{max}} = 2z_{b_{min}} = 2\,[(H_a + T_a) + |\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_m|].$$

Notons que le défaut de position ρ_a résultant de l'usinage antérieur et le défaut de mise en place relatif à l'opération en cours rendent

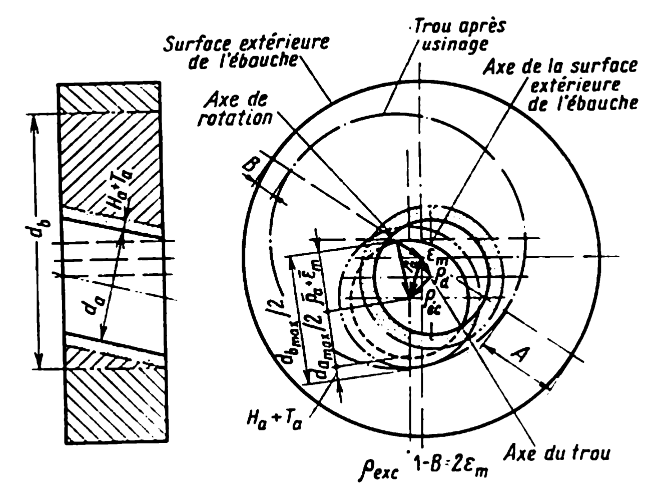


Fig. 175. Illustration du calcul d'une surépaisseur symétrique minimale lors de l'exécution d'un trou

la surface extérieure de l'ébauche excentrique par rapport au trou usiné suivant la cote $d_{b_{max}}$. Lors du calcul de la surépaisseur pour le façonnage de la surface extérieure, qui prévoit le positionnement suivant le trou usiné, il faut tenir compte de cette excentricité qui constitue alors un défaut de position relative.

En procédant d'une manière analogue pour établir une surépaisseur asymétrique pour la surface intérieure et une surépaisseur symétrique pour la surface extérieure, on obtient les mêmes formules. Toutefois, les surépaisseurs d'usinage des surfaces extérieures sont définies comme étant la différence des cotes limites minimales, alors que celles d'usinage des surfaces intérieures, comme la différence entre les cotes limites maximales, produites par deux reprises voisines.

On ne tient pas compte des écarts de cote et des défauts de forme de la surface usinée, car lors de l'usinage des surfaces extérieures, la cote de référence pour le calcul des surépaisseurs minimales $z_{b_{\min}}$ et $2z_{b_{\min}}$ est la cote limite minimale, et lors de l'usinage des surfaces intérieures, la cote de référence est la cote limite maximale; tous les écarts à partir de ces cotes ne font qu'augmenter la surépaisseur réelle par rapport à la surépaisseur minimale pratique.

L'addition des écarts de position ρ_a avec le défaut de mise en place ε_m se fait compte tenu des directions de ces vecteurs.

Dans tous les cas de l'usinage des plans, les vecteurs $\bar{\rho}_a$ et $\bar{\varepsilon}_m$ sont collinéaires; on obtient donc

$$|\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_m| = (\rho_a + \varepsilon_m),$$

ce qui signifie que la somme vectorielle est définie par la somme arithmétique des grandeurs des vecteurs.

Lors de l'exécution des surfaces de révolution extérieures et intérieures, les vecteurs ρ_a et ε_m peuvent prendre une position angulaire quelconque qu'il est impossible de prévoir à l'avance; aussi, pour obtenir leur valeur totale la plus probable, l'addition des vecteurs $\bar{\rho}_a$ et $\bar{\varepsilon}_m$ doit s'effectuer suivant la règle d'addition, c'est-à-dire qu'il faut adopter

$$|\bar{\rho}_a + \bar{\varepsilon}_m| = \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_m^2}.$$

Ainsi, pour définir les surépaisseurs, on obtient les formules suivantes:

a) surépaisseur asymétrique pour l'usinage successif des plans opposés

$$z_{b_{\min}} = (H_a + T_a) + (\rho_a + \varepsilon_m); \qquad (133)$$

b) surépaisseur symétrique pour l'usinage simultané des plans opposés

$$2z_{b_{\min}} = 2\,[(H_a + T_a) + (\rho_a + \varepsilon_m)]; \qquad (134)$$

c) surépaisseur symétrique pour l'usinage des surfaces de révolution extérieures et intérieures

$$2z_{b_{\min}} = 2\,[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_m^2}]. \qquad (135)$$

La caractéristique de la qualité des surfaces des ébauches à des stades divers de la fabrication permet avec une précision suffisante pour des buts pratiques d'adopter pour le calcul des surépaisseurs d'usinage des grandeurs approximatives des rugosités superficielles et de la profondeur de la couche superficielle défectueuse. On sait que la profondeur de la couche décarburée est définie par la nuance de l'acier employé pour la fabrication de la pièce forgée. Cependant,

en calculant la surépaisseur de dégrossissage, on peut négliger la différence entre les profondeurs de cette couche établies en fonction des nuances variées de l'acier au carbone ou allié et adopter des valeurs plus grandes de H_a et de T_a. Les défauts de la couche superficielle sont également influencés dans une certaine mesure par les dimensions des pièces brutes; il est donc avantageux d'établir pour les pièces venues brutes de fonderie plusieurs groupes dimensionnels en fonction de leurs dimensions maximales. Pour les pièces estampées, on établit également plusieurs groupes en fonction du poids.

Lors de l'usinage des ébauches, les valeurs de H_a et de T_a sont déterminées par les modes d'usinage [1].

Pour l'exécution des surfaces de révolution extérieures et intérieures, la valeur totale des écarts de position est définie par l'addition vectorielle; il est impossible de prévoir à l'avance la position angulaire des vecteurs qui caractérisent ces écarts de position. C'est pourquoi pour obtenir la valeur totale la plus probable, le calcul de ces vecteurs doit s'opérer suivant la règle du rectangle; ainsi, on ne peut pas prévoir la direction du vecteur de la courbure des ébauches estampées de pièces cylindriques longues (arbres, leviers, etc.), ou la direction du vecteur définissant l'excentricité des trous percés à la presse dans des disques par rapport au vecteur de déplacement des matrices. Donc

$$\bar{\rho}_d + \bar{\rho}_c = \sqrt{\rho_d^2 + \rho_c^2}; \qquad (136)$$

$$\bar{\rho}_d + \bar{\rho}_{cx} = \sqrt{\rho_d^2 + \rho_{cx}^2},$$ [1]

où $\bar{\rho}_d$ est le déplacement des matrices;

$\bar{\rho}_c$, la courbure totale de la pièce cylindrique longue;

ρ_{cx}, l'excentricité du trou par rapport à la surface extérieure du disque.

Lors du calcul des surépaisseurs d'usinage des surfaces des pièces coulées, il faut tenir compte du déplacement de l'axe du trou par rapport aux surfaces de référence. La valeur du déplacement doit être choisie en fonction de la distance entre l'axe du trou et la surface de référence; elle est donnée par les tableaux des écarts admissibles suivant les cotes des pièces de fonderie.

Lors du positionnement suivant un trou brut, la valeur de $\bar{\rho}_a$ (déplacement de son axe) doit être prévue par la surépaisseur d'usinage imposée à la surface considérée. Dans le cas de l'exécution d'un trou brut associé à une surface de référence, la valeur de $\bar{\rho}_a$ doit être prévue par la surépaisseur imposée au trou.

La surépaisseur devant compenser le gauchissement d'une pièce coulée est établie en fonction de la construction et des spécifications

[1] Annexes 5a et 5b.

dimensionnelles de la pièce, c'est-à-dire de sa rigidité. Il est d'usage d'enlever cette surépaisseur au dégrossissage qui diminue nettement le défaut tout en le laissant encore perceptible. L'élimination des couches supérieures sollicitées du métal perturbe au dégrossissage l'équilibre des contraintes internes et provoque la déformation de l'ébauche. Aussi le calcul de la surépaisseur de semi-finition ou de finition doit-il tenir compte de l'ensemble du gauchissement résiduel et du gauchissement dû à la redistribution des contraintes internes. On pose que la résultante des défauts de position est égale approximativement à la double valeur du gauchissement résiduel:

$$\rho_{cal} = 2K_{pr}\rho_g = 2\rho_{rés}, \qquad (137)$$

où K_{pr} est le coefficient de précision défini par la formule (51);
ρ_g, le gauchissement de la pièce brute.

Pour les pièces venues brutes de fonderie, la valeur du gauchissement est calculée d'après la formule (83):

$$\rho_g = \Delta_g L,$$

où Δ_g est la valeur spécifique du gauchissement en μ/mm;
L, la cote de la surface (longueur de l'ébauche) pour laquelle on calcule la surépaisseur en mm. Pour les pièces coulées constituées de surfaces planes étendues (supports et plaques), Δ_g varie de 0,7 à 3 μ/mm [1].

Lors de l'usinage entre pointes, la valeur de la surépaisseur est nettement influencée par le défaut de centrage, c'est-à-dire par le déplacement de l'axe des centres par rapport à l'axe géométrique de l'ébauche. Le défaut de centrage est défini par les défauts de forme des portées de l'ébauche qui assurent son positionnement lors du centrage, la flèche de l'ébauche et le défaut de réglage de la machine à centrer. Mais comme l'influence de la flèche de l'ébauche sur le défaut de centrage est négligeable (5 à 15 μ pour les arbres d'un diamètre de 18 à 180 mm), la précision du centrage est pratiquement suffisante même si l'on n'en tient pas compte; le défaut de centrage est alors déterminé seulement en fonction des défauts de forme des portées qui assurent le positionnement de l'ébauche lors du centrage, et des défauts de réglage de la machine à centrer; voici la formule employée dans ce cas:

$$\rho_{cen} = \sqrt{\Delta_f^2 + \Delta_r^2}, \qquad (138)$$

où Δ_f est l'action exercée par le défaut de forme des portées assurant le positionnement lors du centrage sur le déplacement de l'axe des centres par rapport à l'axe géométrique de l'ébauche:

[1] Pour les plaques prendre Δ_g = 2 à 3 μ/mm et pour les supports, Δ_g = 0,7 à 1 μ/mm, suivant la rigidité de l'ébauche.

Δ_r, l'action du défaut de réglage de la machine à centrer sur le déplacement de l'axe des centres par rapport à l'axe de l'ébauche.

Les défauts de forme des pièces dont les cotes transversales sont inférieures à 500 mm ne dépassent pas généralement la moitié des tolérances imposées; compte tenu de ce fait et en posant que les conditions de mise en place d'une ébauche à défaut de forme unilatéral sur les vés d'une machine à centrer sont les plus défavorables, on voit que ce défaut entraîne le déplacement de l'axe de l'ébauche par rapport à l'axe des vés de la machine à une valeur approximative de 0,25 δ. Le défaut de réglage de la machine, c'est-à-dire l'écart de l'axe des broches par rapport à l'axe des vés d'ablocage, est réduit sans difficultés à la valeur ne dépassant pas 0,25 mm; dans ces conditions, l'angle établi par réglage entre le vecteur du défaut de réglage et celui du déplacement de l'axe de l'ébauche par rapport à l'axe des vés de la machine à centrer peut être quelconque. La formule (138) nous permet alors de calculer la valeur la plus probable du défaut de centrage (ρ_{cen}, en mm)

$$\rho_{cen} = \sqrt{(0{,}25\delta)^2 + 0{,}25^2}$$

ou

$$\rho_{cen} = 0{,}25\sqrt{\delta^2 + 1}, \qquad (139)$$

où δ est la tolérance sur la cote diamétrale de l'ébauche en mm.

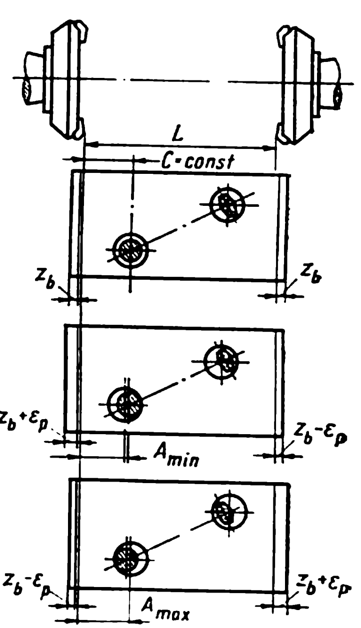


Fig. 176. Positionnement d'une pièce de support d'après un plan et deux trous de tenue pratiqués dans ce plan

Pour le façonnage simultané des plans opposés avec le positionnement suivant le plan d'appui et les deux trous de tenue (fig. 176), le défaut de positionnement est calculé d'après la formule (8):

$$\varepsilon_L = s_{min} + \delta_A + \delta_B ;$$

le bridage qui serre l'ébauche aux éléments d'appui du montage, auquel on recourt généralement dans de pareils cas, n'influe pas sur la cote à respecter L et sur la surépaisseur d'usinage z_b. Le défaut de mise en place est donc défini par celui de positionnement ε_{pos}. Comme ce dernier peut se produire dans les deux sens, il faut ajouter

à la surépaisseur sur la cote L un double défaut de mise en place:

$$2\varepsilon_L = 2(s_{min} + \delta_A + \delta_B).$$

On sait que lors de l'exécution des surfaces de révolution, le défaut de mise en place n'agit pas directement sur la cote à respecter, mais si l'on veut obtenir une bonne qualité, il doit être compensé par une augmentation respective de la surépaisseur d'usinage. Voici quelques exemples illustratifs de l'action exercée par le défaut de mise en place sur la valeur de la surépaisseur.

Posons que les pièces d'un lot exécutées par obtention automatique des cotes sur des machines réglées à l'avance sont positionnées suivant le trou dont la cote varie d'une ébauche à l'autre dans les limites de δ_A.

L'usinage s'opère sur plusieurs machines-outils et donc sur plusieurs mandrins, dont le diamètre varie dans les limites de δ_B.

Lorsque l'ébauche est ajustée sur un mandrin avec un jeu uniforme, les axes du mandrin et de l'ébauche se confondent (fig. 177,*a*), et le défaut de positionnement est nul (par suite de la coïncidence des éléments de départ et de référence); la surépaisseur nécessaire pour la réalisation de la cote D_b à partir de la cote D_a est définie comme la différence entre ces cotes:

$$2z_b = D_a - D_b.$$

Pourtant, la probabilité d'un ajustement aussi précis est infime: le déplacement de l'axe de l'ébauche par rapport à l'outil mis à la cote varie pratiquement dans les limites de

$$A_{max} = C + \frac{d_{A_{max}} - d_{B_{min}}}{2} \qquad \text{(fig. 177,}b\text{)}$$

à

$$A_{min} = C - \frac{d_{A_{max}} - d_{B_{min}}}{2} \qquad \text{(fig. 177,}c\text{).}$$

Le défaut de positionnement ε_{pos} est défini comme la différence entre les distances limites de l'élément de référence, c'est-à-dire entre l'axe de l'ébauche et l'outil mis à la cote:

$$\varepsilon_{pos} = A_{max} - A_{min} = C + \frac{d_{A_{max}} - d_{B_{min}}}{2} - C + \frac{d_{A_{max}} - d_{B_{min}}}{2};$$

$$\varepsilon_{pos} = \frac{s_{max}}{2} + \frac{s_{max}}{2} = s_{max} = s_{min} + \delta_A + \delta_B,$$

où s_{max} est le jeu maximal;
s_{min}, le jeu minimal assuré;
δ_A, la tolérance sur la cote du trou;
δ_B, la tolérance sur la cote du mandrin.

Le déplacement de l'axe de l'ébauche par rapport à l'arête tranchante rend asymétrique la disposition de la surépaisseur par rapport à l'axe de révolution, et la surépaisseur peut devenir insuffisante d'un

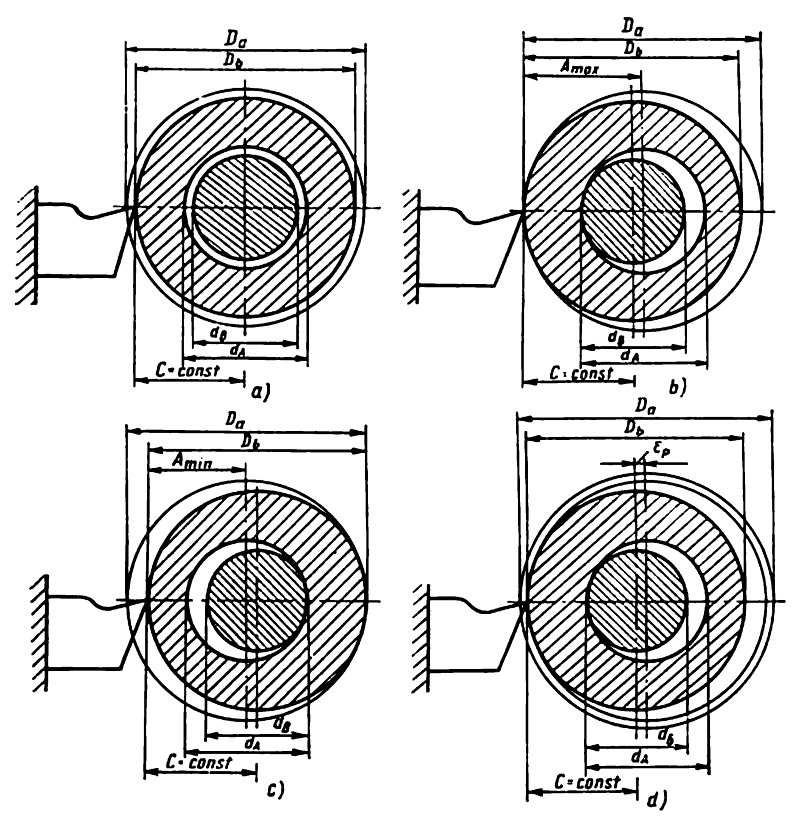


Fig. 177. Influence du défaut de positionnement sur la valeur de la surépaisseur lors d'un ajustement avec jeu d'une ébauche sur un mandrin:

a — jeu uniforme ; *b* — axe de l'ébauche déplacé à la valeur du jeu ; *c* — pivotement de l'ébauche serrée à 180° ; *d* — surépaisseur prévoyant un double défaut de positionnement

côté de l'ébauche (fig. 177,*b*) ; par conséquent, pour obtenir un usinage de qualité il faut ajouter à la surépaisseur la valeur du double défaut de positionnement (fig. 177,*d*), c'est-à-dire

$$2\varepsilon_{pos} = 2\,(s_{\min} + \delta_A + \delta_B).$$

Lors de la fixation du mandrin entre pointes rigides, on peut poser que le défaut d'ablocage est nul ($\varepsilon_s = 0$) ; alors, le défaut de mise en place est défini par celui du positionnement de l'ébauche

sur le mandrin. Il est évident que l'excentricité de la surface extérieure usinée par rapport au trou est égale à la double valeur du défaut de positionnement.

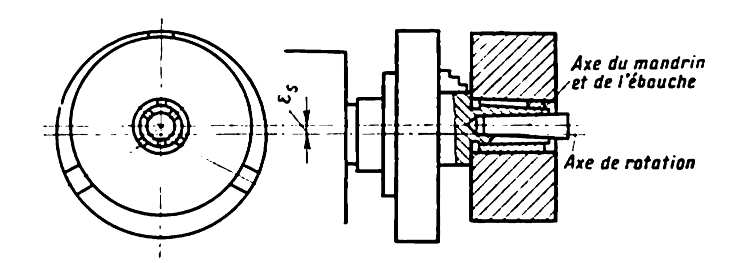


Fig. 178. Défaut de mise en place lors de l'ablocage d'une ébauche sur un mandrin extensible fixé sur un plateau à centrage concentrique

Lorsque l'ébauche est montée sur un mandrin extensible, le jeu est rattrapé et on peut poser que le défaut de positionnement est nul ($\varepsilon_p = 0$), mais la fixation du mandrin extensible sur un plateau à serrage concentrique peut provoquer un défaut d'ablocage par suite du déplacement du mandrin extensible dans le sens radial produit par un refoulement irrégulier des mors du plateau; dans ce cas (fig. 178), le défaut de mise en place est égal à celui d'ablocage, dont on doit tenir compte justement lors du calcul de la surépaisseur.

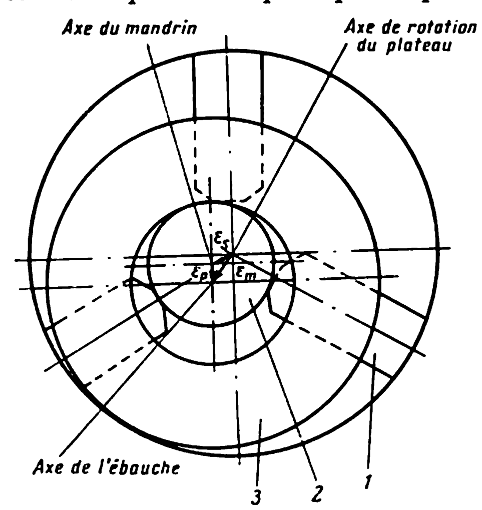


Fig. 179. Défaut de positionnement lors d'un ajustement avec jeu d'une ébauche sur un mandrin fixé sur un plateau à serrage concentrique:

1 — plateau; *2* — mandrin; *3* — ébauche

La pose d'une ébauche sur un mandrin cylindrique donne lieu à un défaut de positionnement, et le serrage de ce mandrin sur un plateau à trois mors produit en plus un défaut d'ablocage. Le défaut de mise en place dans ce cas résulte de l'addition des vecteurs du défaut de positionnement $\bar{\varepsilon}_p$ et du défaut d'ablocage

$\bar{\varepsilon}_a$ (fig. 179):

$$\bar{\varepsilon}_m = \bar{\varepsilon}_p + \bar{\varepsilon}_s;$$

cette somme vectorielle est calculée suivant la formule

$$\varepsilon_m = \sqrt{\varepsilon_p^2 + \varepsilon_s^3 + 2\varepsilon_p \varepsilon_s \cos(\bar{\varepsilon}_p, \bar{\varepsilon}_s)},$$

où $(\bar{\varepsilon}_p, \bar{\varepsilon}_s)$ est l'angle formé par le vecteur $\bar{\varepsilon}_s$ avec le vecteur $\bar{\varepsilon}_p$.

Lors de la mise en place des pièces d'un lot, les vecteurs $\bar{\varepsilon}_p$ et $\bar{\varepsilon}_s$ peuvent former des angles quelconques. C'est pourquoi il convient de les additionner suivant la règle du rectangle. Ainsi

$$\varepsilon_m = \sqrt{\varepsilon_p^2 + \varepsilon_s^2},$$

c'est-à-dire dans ce cas le défaut de mise en place est calculé d'après la formule (11).

Pour illustrer l'action commune des défauts de position et du défaut de mise en place sur la valeur de la surépaisseur, examinons

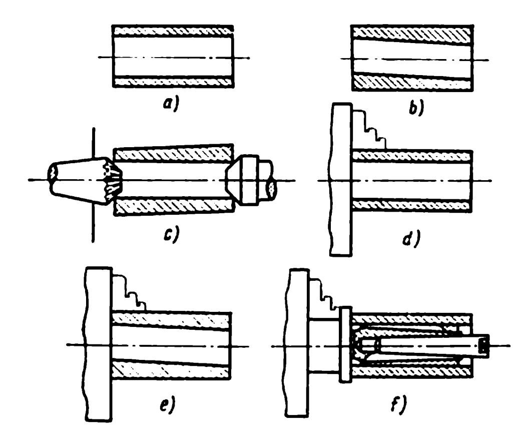


Fig. 180. Illustration du calcul des surépaisseurs d'usinage d'une bague coulée:
a — bague finie; *b* — ébauche; *c* et *d* — modes d'usinage suivant la première variante; *e* et *f* — modes d'usinage suivant la deuxième variante

deux variantes d'usinage d'une bague coulée; dans le premier cas, le positionnement se fait suivant le trou venu de fonderie, et dans le deuxième, suivant la surface extérieure.

Le montage du moule pour la fabrication de la bague représentée sur la fig. 180,*a* peut donner lieu au déplacement du noyau et rendre possible l'écartement de l'axe du trou par rapport à la surface extérieure de l'ébauche coulée (fig. 180,*b*). Lors du façonnage de la surface extérieure de la bague avec positionnement suivant le trou

(fig. 180,*c*), la surépaisseur pour l'usinage de la surface extérieure est calculée suivant la formule (135):

$$2z_{b_1} = 2\left[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_{m_1}^2}\right].$$

Dans ce cas, le défaut de position, c'est-à-dire le déplacement de l'axe du trou atteignant 1 mm pour les bagues d'un diamètre de 100 mm et d'une longueur de 200 mm (2e classe de précision des pièces coulées), se traduit par une surépaisseur irrégulière par rapport à la surface extérieure; donc $\rho_a = 1000\ \mu$. Le défaut de mise en place suivant la fig. 180,*c* n'a pas lieu ($\varepsilon_{m_1} = 0$). En posant $H_a = 300\ \mu$ et $T_a = 300\ \mu$, on obtient la surépaisseur imposée à la surface extérieure:

$$2z_{b_1} = 2\left[(300 + 300) + \sqrt{1000^2}\right] = 3200\mu.$$

Lors du façonnage ultérieur du trou (deuxième opération), le positionnement s'effectuant suivant la surface extérieure usinée (fig. 180,*d*), le défaut de position résiduel, c'est-à-dire le déplacement de l'axe du trou par rapport à la surface extérieure, est défini par la formule (52):

$$\rho_{rés} = W_{syst} A\left[t^x - (t - \rho_a)^x\right].$$

En posant la flexibilité de la machine $W_m = 1\ \mu$/kg et en négligeant la flexibilité de la bague usinée, on obtient la flexibilité du système $W_{syst} = 1\ \mu$/kg.

Calculons la valeur[1] de

$$A = C_y s^y H_B^n;$$

$$A = 0{,}045 \cdot 0{,}4^{0,75} \cdot 180^{1,3} = 19{,}24.$$

En introduisant un coefficient qui rend compte de la vitesse de coupe ($v = 120$ m/mn), on obtient

$$A = 19{,}24 \cdot 0{,}7 \approx 13{,}5.$$

Dans ces conditions, il vient

$$\rho_{rés} = 1 \cdot 13{,}5\left[1{,}6^{0,9} - (1{,}6 - 1)^{0,9}\right] \approx 12\ \mu.$$

Le défaut de mise en place sur un plateau à serrage concentrique après le dégrossissage: $\varepsilon_{m_2} = 150\ \mu$. La surépaisseur donnée par la formule (135) vaut donc

$$2z_{b_2} = 2\left[(300 + 300) + \sqrt{12^3 + 150^2}\right] \approx 1500\ \mu.$$

Si l'usinage se fait suivant la deuxième variante, la surface d'appui étant la surface extérieure de l'ébauche brute (fig. 180,*e*),

[1] Voir la déduction de la formule (49).

le déplacement de l'axe du trou $\rho_a = 1000\ \mu$ fait partie de la surépaisseur d'usinage. Le défaut d'ablocage suivant la surface brute extérieure sur un plateau à serrage concentrique $\varepsilon_{m_3} = 400\ \mu$. Ainsi suivant la formule (135) la surépaisseur d'usinage du trou

$$2z_{b_3} = 2\,[(300+300) + \sqrt{1000^2+400^2}] \approx 3400\ \mu.$$

Lors du façonnage ultérieur de la surface extérieure, le positionnement s'effectuant sur un mandrin extensible suivant le trou usiné (fig. 180,*f*), on a $\varepsilon_p = 0$ et $\varepsilon_s = 80\ \mu$, c'est-à-dire $\varepsilon_{m_4} = 80\ \mu$. Le défaut de position résiduel résultant du déplacement de l'axe du trou par rapport à la surface extérieure de l'ébauche brute est donné par la formule

$$\rho_{rés} = W_{syst} A\,[t^x - (t-\rho_a)^x] = 1\cdot 13{,}5\,[1{,}7^{0,9} - (1{,}7-1)^{0,9}] = 12\,\mu.$$

Lorsque le trou brut est usiné avec le positionnement suivant la surface brute extérieure, l'excentricité du trou par rapport à la surface extérieure produite par le défaut de mise en place $\varepsilon_{m_3} = 400\ \mu$ vaut :

$$\rho_{exc} = 2\varepsilon_{m_3} = 2\cdot 400 = 800\ \mu.$$

La valeur totale des défauts de position

$$\bar{\rho}_a = \bar{\rho}_{exc} + \rho_{rés} = \sqrt{800^2+12^2} \approx 800\ \mu.$$

Donc la surépaisseur d'usinage de la surface extérieure avec le positionnement suivant le trou exécuté est donnée par la formule (135) :

$$2z_{b_4} = 2\,[(300+300) + \sqrt{800^2+80^2}] \approx 2808\ \mu \approx 2{,}8\ \text{mm}.$$

Ainsi les surépaisseurs imposées par les variantes d'usinage considérées sont : a) pour l'exécution de la surface extérieure suivant la première variante, $2z_b = 3{,}2$ mm ; suivant la deuxième variante, $2z_b = 2{,}8$ mm ; b) pour l'exécution du trou suivant la première variante $2z_b = 1{,}5$ mm ; suivant la deuxième variante, $2z_b = 3{,}4$ mm.

L'exemple que nous venons d'examiner montre que les défauts de position restés après la reprise précédente et le défaut de mise en place de l'ébauche lors de la reprise en cours influent notablement sur la valeur de la surépaisseur. C'est pourquoi le calcul de cette dernière doit s'effectuer compte tenu des conditions d'usinage à exécuter. Or, les données fournies par les tableaux dressés suivant la méthode statistique d'établissement des surépaisseurs ne permettent pas de faire face à tous les facteurs multiples qui définissent la marche de l'opération ; c'est pourquoi les surépaisseurs choisies en se guidant par ces tableaux doivent être augmentées.

Pour confirmer ce qui vient d'être dit, confrontons les valeurs obtenues par calcul avec celles imposées par les normes. Les surépaisseurs nominales nécessaires pour l'exécution d'une bague d'un diamètre extérieur de $100_{-0,14}$ mm, d'un diamètre intérieur de $84^{+0,07}$ mm et d'une longueur de 200 mm, faisant partie du deuxième groupe des pièces coulées suivant la norme considérée, sont les mêmes pour la surface extérieure et le trou et valent 5 mm par diamètre. Pour pouvoir confronter ces valeurs avec les surépaisseurs minimales que nous avons obtenues, transformons-les en surépaisseurs nominales en faisant appel aux formules (125) et (130):

a) pour la surface extérieure

$$2z_{b_{nom}} = 2z_{b_{min}} + H_{D_a} - H_{D_b} ;$$

suivant la première variante,

$$2z_{b_{nom}} = 3,2 + 0,8 - 0,14 = 3,86 \text{ mm} ;$$

suivant la deuxième variante,

$$2z_{b_{nom}} = 2,8 + 0,8 - 0,14 = 3,46 \text{ mm} ;$$

b) pour le trou

$$2z_{b_{nom}} = 2z_{b_{min}} - B_{D_b} + B_{D_a} ;$$

suivant la première variante,

$$2z_{b_{nom}} = 1,5 - 0,07 + 0,8 = 2,23 ;$$

suivant la deuxième variante,

$$2z_{b_{nom}} = 3,4 - 0,07 + 0,8 = 4,13.$$

La différence entre les surépaisseurs données par la norme et le calcul:

a) suivant la première variante: pour la surface extérieure, $5 - 3,86 = 1,14$ mm; pour le trou, $5 - 2,23 = 2,77$ mm; au total, 3,91 mm ou 4 mm environ;

b) suivant la deuxième variante: pour la surface extérieure, $5 - 3,46 = 1,54$ mm; pour le trou, $5 - 4,13 = 0,87$ mm; au total, 2,41 ou 2,5 mm environ.

Dans les conditions d'une fabrication en série et d'autant plus, en grande série, une différence aussi grande n'a aucune justification, car elle augmente nettement le débit du métal, la consommation de l'énergie électrique, le nombre des outils, de même que la quantité de travail nécessaire.

Il est fort à propos de noter que lors de l'établissement des gammes d'usinage le calcul des surépaisseurs permet souvent de

trouver une variante optimale pour la pièce considérée. Dans notre exemple, notamment, la variante optimale est la première variante.

Dans certains cas concrets on exclut tels ou tels termes des formules pratiques déterminant les surépaisseurs d'usinage.

Dans la rectification sans centre le défaut de mise en place n'a pas lieu et la surépaisseur d'usinage s'établit alors d'après la formule

$$2z_{b_{\min}} = 2\,[(H_a + T_a) + \rho_a].$$

Dans les formules pratiques on rejette les termes qui traduisent les défauts impossibles à corriger par la reprise en cours; ainsi, le

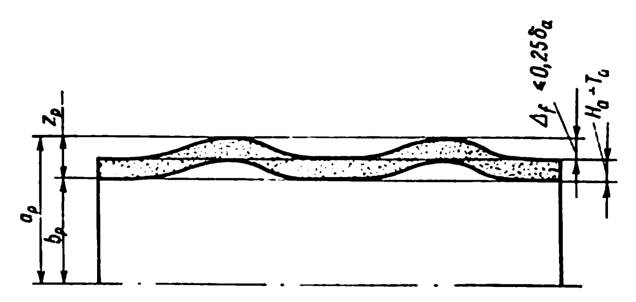


Fig. 181. Illustration du calcul de l'épaisseur de la couche à enlever par usinage sans mise à la cote

travail avec un alésoir à lame flottante et le brochage des trous ne corrigent pas l'excentricité et l'écartement de l'axe; le défaut de mise en place n'apparaît donc pas et le calcul se fait suivant la formule

$$2z_{b_{\min}} = 2\,(H_a + T_a).$$

La surépaisseur de superfinition et de polissage qui ne font qu'améliorer l'état de surface, est définie par la hauteur des rugosités, c'est-à-dire

$$2z_{b_{\min}} = 2H_a.$$

Lorsque l'usinage d'une surface brute avec des outils tranchants s'effectue sans mise à la cote (fig. 181), la couche de métal enlevée z_p est définie par l'épaisseur de la couche superficielle $(H_a + T_a)$ et le défaut de forme géométrique de la surface usinée Δ_f qui généralement ne dépasse pas le 1/4 de la tolérance d'une ébauche brute prévue pour chaque côté ($\Delta_f = 0{,}25\ \delta_a$), c'est-à-dire

$$z_p = (H_a + T_a) + 0{,}25\delta_a.$$

Si après un traitement thermique la pièce est rectifiée, la couche superficielle doit être conservée au possible, et donc le terme T_a

doit être exclu de la formule; ainsi, dans le cas d'un défaut de mise en place :

$$z_{b_{min}} = H_a + \rho_a + \varepsilon_m ;$$

$$2z_{b_{min}} = 2\left(H_a + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_m^2}\right);$$

et dans celui où ce défaut n'existe pas:

$$z_{b_{min}} = H_a + \rho_a ;$$

$$2z_{b_{min}} = 2\left(H_a + \rho_a\right).$$

Les défauts de position résultant des déformations éventuelles pouvant apparaître après un traitement thermique ou thermochimique doivent être compensés par la valeur ρ_a.

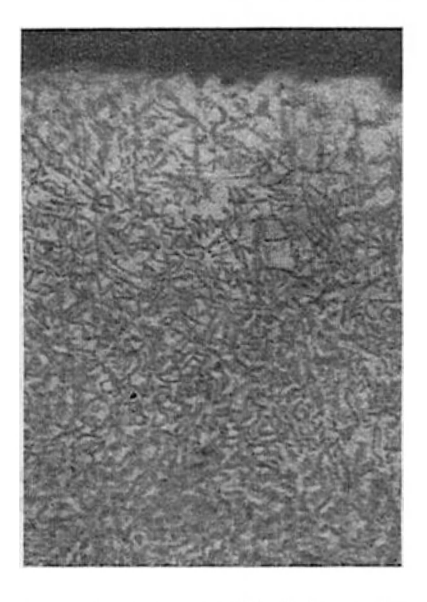


Fig. 182. Micrographie de la couche superficielle après cémentation et trempe simple



Fig. 183. Micrographie de la couche superficielle après cémentation et trempe double

La formule pratique des surépaisseurs d'un usinage venant après traitement thermique ne comporte pas de terme T_a, dont l'exclusion est justifiée par les recherches spécialement entreprises à cet effet.

Des échantillons en acier 18 XΓT de 40 mm de diamètre et longs de 320 mm étaient d'abord rectifiés avec une meule au grain 60. Ensuite, une partie des échantillons a été soumise à la cémentation,

alors que l'autre a subi la cyanuration. Les régimes du traitement thermochimique étaient les suivants.

1) Cémentation à la température de 920 à 930° dans un four pendant 10 h. Refroidissement jusqu'à la température de 840° et trempe directe à l'huile à partir de 840°. Revenu après trempe jusqu'à 200° pendant 1,5 h. L'analyse des échantillons ainsi obtenus a montré que la couche superficielle est constituée d'une martensite à structure aciculaire fine et d'une faible part d'austénite résiduelle (fig. 182).

Fig. 184. Micrographie de la couche superficielle après cyanuration et trempe

Fig. 185. Micrographie de la couche superficielle après rectification de l'échantillon représenté sur la fig. 1823

2) Cémentation, trempe et revenu au même régime, mais avec une deuxième trempe à l'huile à partir d'une température de 830 ou 840°, et un revenu à 200° pendant 1,5 h. D'après l'analyse, la couche superficielle de ces échantillons a une structure martensitique très dispersée avec une faible quantité de carbures fins près de la surface (fig. 183).

La profondeur de la couche cémentée de tous les échantillons soumis à l'opération était de 900 à 1000 p.

3) Cyanuration avec échauffement dans un bain de cyanure jusqu'à la température de 860°, maintien à cette température pendant

1 h, trempe à l'huile et revenu à la température de 200° pendant 1,5 h. L'analyse a montré que la couche superficielle de ces échantillons était constituée d'une martensite troostique très dispersée (fig. 184). La profondeur de la couche cyanurée variait de 480 à 500 μ.

L'analyse de la microstructure des échantillons ayant subi le traitement thermochimique n'a révélé dans la couche superficielle

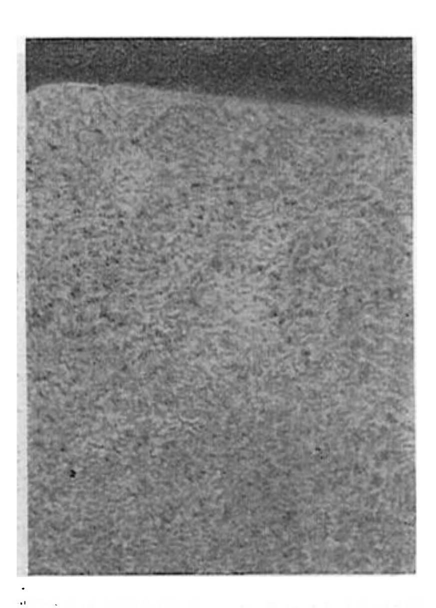


Fig. 186. Micrographie de la couche superficielle après rectification de l'échantillon représenté sur la fig. 183

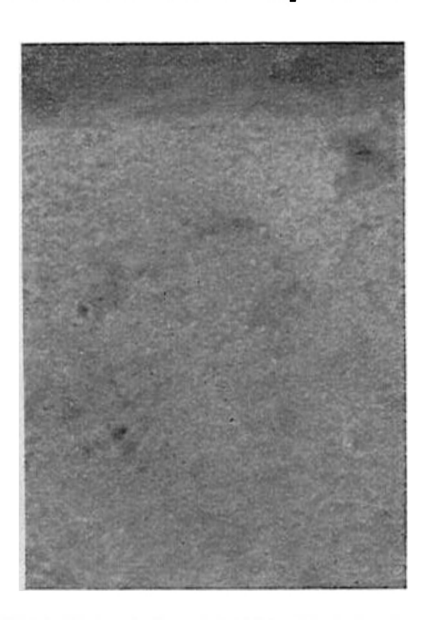


Fig. 187. Micrographie de la couche superficielle après rectification de l'échantillon représenté sur la fig. 184

aucune zone de déformation bien marquée, phénomène courant pour les ébauches non trempées mais rectifiées préalablement. Le traitement thermique a sans doute fait disparaître les tensions résiduelles créées dans la couche superficielle par la rectification. On peut penser que la rectification n'a pas produit dans la couche superficielle de zone décarburée.

Après le traitement thermochimique les échantillons cémentés et cyanurés ont été rectifiés à la profondeur de 200 μ. L'analyse qui a suivi a montré que la structure des échantillons est restée la même, aucune couche superficielle défectueuse n'étant pas apparue (fig. 185-187). On a donc toutes raisons pour exclure de la formule

des surépaisseurs d'usinage le terme T_a qui caractérise la profondeur de la zone défectueuse de la couche superficielle.

La valeur des termes faisant partie des formules pratiques des surépaisseurs d'usinage est fonction de la forme et des spécifications dimensionnelles de l'ébauche en œuvre, du matériau traité, des modes d'exécution de l'ébauche et de son usinage ultérieur, ainsi que de sa mise en place pour l'usinage sur une machine-outil. C'est pourquoi tous les ouvrages de référence nécessaires au calcul des surépaisseurs doivent être classés suivant le type des pièces mécaniques en fonction des relations dimensionnelles entre les surfaces élémentaires associées, le matériau en œuvre et les procédés d'usinage.

Les ouvrages de référence établis pour une branche définie de la construction mécanique doivent être conçus compte tenu de la classification des pièces mécaniques et des particularités de la gamme de production propre à la branche considérée de la mécanique.

Le calcul des surépaisseurs de fabrication se fait pour définir les cotes limites de l'ébauche relatives à toutes les reprises de la gamme de fabrication, depuis la pièce finie jusqu'à la pièce brute.

Les formules pratiques des cotes de fabrication sont déduites à partir des formules pratiques initiales des surépaisseurs:

$$z_{b_{\min}} = a_{\min} - b_{\min}$$

pour les surfaces extérieures, et

$$z_{b_{\min}} = b_{\max} - a_{\max}$$

pour les surfaces intérieures.

Ces formules permettent de définir les cotes limites qui doivent être réalisées par la reprise antérieure:

$$a_{\min} = b_{\min} + z_{b_{\min}}; \quad a_{\max} = a_{\min} + \delta_a$$

pour les surfaces extérieures, et

$$a_{\max} = b_{\max} - z_{b_{\min}}; \quad a_{\min} = a_{\max} - \delta_a$$

pour les surfaces intérieures;

ici $a_{\max}$ et $a_{\min}$ sont les cotes limites maximale et minimale résultant de la reprise antérieure;

$b_{\max}$ et $b_{\min}$, les cotes limites maximale et minimale réalisées par la reprise en cours;

δ_a, la tolérance sur la cote de la reprise antérieure.

Ainsi, la cote imposée par le dessin d'exécution permet de définir les cotes de fabrication pour toutes les reprises de même que les cotes limites de la pièce brute.

Les cotes de fabrication peuvent être également établies à partir des surépaisseurs d'usinage maximales; mais pour simplifier, le calcul se fait à partir des surépaisseurs minimales.

Tableau 5

Ordre de calcul des surépaisseurs de fabrication et des cotes limites en fonction des reprises d'une gamme de fabrication

<table>
<tr><th>Surfaces extérieures</th><th>Surfaces intérieures</th></tr>
<tr><td colspan="2">1. Etablir les surfaces de départ et le routage de l'ébauche
2. Porter sur la fiche d'instructions détaillées les surfaces élémentaires repérées et l'ordre successif des reprises pour chacune de ces surfaces
3. Noter les valeurs de H_a, T_a, ρ_a, ε_m, δ_a
4. Calculer les surépaisseurs d'usinage $z_{b\,min}$ pour toutes les reprises</td></tr>
<tr><td>5. Noter pour la reprise terminale dans la rubrique « Cote de travail » la cote limite minimale de la pièce établie suivant le dessin</td><td>5. Noter pour la reprise terminale dans la rubrique « Cote de travail » la cote limite maximale de la pièce établie suivant le dessin</td></tr>
<tr><td>6. Calculer la cote de travail pour la reprise qui précède la reprise terminale, en additionnant à la cote limite minimale imposée par le dessin la surépaisseur calculée $z_{b\,min}$</td><td>6. Calculer pour la reprise antérieure à la reprise terminale la cote de travail, en soustrayant de la cote limite maximale donnée par le dessin la surépaisseur calculée $z_{b\,min}$</td></tr>
<tr><td>7. Calculer successivement les cotes de travail pour chaque reprise antérieure en additionnant à la cote de travail imposée à la reprise qui la suit la surépaisseur calculée $z_{b\,min}$</td><td>7. Calculer successivement les cotes pour chaque reprise antérieure, en soustrayant de la cote de travail imposée à la reprise qui la suit la surépaisseur calculée $z_{b\,min}$</td></tr>
<tr><td>8. Noter les cotes limites minimales pour toutes les reprises en arrondissant par excès les cotes de travail; pousser la simplification jusqu'à la décimale avec laquelle est donnée la tolérance sur la cote de chaque reprise</td><td>8. Noter les cotes limites maximales pour toutes les reprises en arrondissant par défaut les cotes de travail; pousser la simplification à la décimale avec laquelle est donnée la tolérance sur la cote de chaque reprise</td></tr>
<tr><td>9. Etablir les cotes limites maximales en ajoutant la tolérance à la cote limite minimale arrondie</td><td>9. Etablir les cotes limites minimales en soustrayant la tolérance de la cote limite maximale arrondie</td></tr>
<tr><td>10. Noter les valeurs limites des surépaisseurs $z_{b\,max}$ en tant que différence entre les cotes limites maximales, et $z_{b\,min}$ en tant que différence entre les cotes limites minimales des reprises antérieure et en cours.</td><td>10. Noter les valeurs limites des surépaisseurs $z_{b\,max}$ en tant que différence entre les cotes limites minimales, et $z_{b\,min}$ en tant que différence entre les cotes limites maximales des reprises antérieure et en cours.</td></tr>
</table>

Suite du tableau 5

Surfaces extérieures	Surfaces intérieures
11. Calculer les surépaisseurs totales z_{0max} et z_{0min} en additionnant les surépaisseurs intermédiaires 12. Vérifier les calculs effectués en confrontant les différences entre les surépaisseurs $z_{bmax} - z_{bmin}$ et les tolérances $\delta_a - \delta_b$ suivant les formules (131) et (132); la différence entre les surépaisseurs de fabrication doit être égale à celle qui existe entre les tolérances sur les cotes de fabrication, alors que la différence entre les surépaisseurs totales, à celle existant entre les tolérances imposées sur les cotes de la pièce brute et de la pièce finie	

Notes. 1. Du fait que les opérations diffèrent suivant qu'il s'agit de surfaces extérieures ou intérieures, pour prévenir les erreurs il est recommandé de ne pas les noter au fur et à mesure de la réalisation des calculs, mais de grouper successivement les chiffres relatifs aux surfaces extérieures, d'une part, et aux surfaces intérieures, de l'autre.

2. Lors de l'usinage des plans associés à partir des points d'appui variables, il est recommandé d'établir les séries dimensionnelles définissant l'association de la surface en oeuvre avec la surface de référence.

3. Lors de l'usinage simultané des plans opposés (fraisage des plans, dressage des faces, etc.), pour améliorer la précision il est recommandé d'égaliser les surépaisseurs en doublant celle qui est la plus grande.

L'ordre de calcul des surépaisseurs et des cotes limites d'une pièce brute relatives aux reprises de fabrication est indiqué dans le tableau 5.

Il est fort à propos de noter que dans un lot d'ébauches les surépaisseurs réelles varient entre $z_{b_{min}}$ et $z_{b_{max}}$ suivant les cotes réelles des ébauches. La surépaisseur minimale n'est qu'une valeur pratique; elle ne correspond à la surépaisseur réelle que dans le cas où la cote limite réelle de l'ébauche est minimale; au fur et à mesure que la cote réelle s'écarte de la cote limite inférieure, la surépaisseur réelle s'accroît de façon correspondante, pour devenir maximale lorsque la cote de l'ébauche atteint son maximum.

§ 2. Calcul des surépaisseurs pour l'obtention unitaire des cotes

Particularités du calcul des surépaisseurs dans les travaux unitaires. Traçage, mode de contrôle de l'aptitude d'une ébauche brute à subir l'usinage et de correction des surépaisseurs établies au départ. Formules pratiques et données approximatives pour le calcul des surépaisseurs. Principes du calcul analytique des surépaisseurs.

Le calcul des surépaisseurs pour l'obtention unitaire des cotes est régi par les mêmes principes que celui de l'obtention automatique des

cotes. Rappelons cependant que dans le cas d'un travail unitaire, la mise en place et le dégauchissage de l'ébauche s'opèrent par rapport aux éléments de travail de la machine; dans ces conditions la cote est respectée grâce à des vérifications effectuées après chaque enlèvement d'un copeau d'essai.

Ainsi, lors de l'obtention unitaire des cotes, le défaut de mise en place ε_m est remplacé dans le calcul des surépaisseurs par le défaut de dégauchissage ε_B.

En usinage d'une ébauche unitaire, la cote de la surface en œuvre ne peut pas être absolument uniforme sur toute l'étendue; elle varie dans certaines limites d'une valeur minimale à une valeur maximale.

Le calcul de la surépaisseur suivant la cote inférieure assure un usinage de qualité; lorsque l'écart de la cote s'accroît à partir de sa valeur minimale, la couche du métal à enlever augmente pour atteindre le maximum au droit où la cote de la surface usinée est la plus grande.

En grosse mécanique, le calcul des surépaisseurs acquiert une importance particulière, car dans le cas des pièces très grosses, les surépaisseurs exagérées ne font pas qu'augmenter les pertes de métal par enlèvement de copeau, mais encore accroissent nettement la durée de l'usinage. Par ailleurs, dans la fabrication de grosses pièces, le rebut résultant des surépaisseurs insuffisantes est absolument inadmissible. C'est pourquoi leur calcul doit se faire de façon à assurer l'obtention d'une pièce saine, compte tenu des particularités de l'exécution de l'ébauche et de son façonnage ultérieur. L'établissement des surépaisseurs pour des pièces unitaires ne peut pas se fonder sur une expérience antérieure; il est donc plus avantageux de procéder à leur calcul préliminaire.

La vérification de la validité d'une pièce brute se fait par le traçage qui permet de mettre en évidence les défauts de forme réels et les défauts de position. Le traçage rend possible le calcul, avec une précision suffisante pour des buts pratiques, de la diminution graduelle des défauts et permet de corriger les surépaisseurs de dégrossissage, d'ébauchage et de semi-finition établies au début.

Le calcul préalable des surépaisseurs et leur correction après la fabrication et le traçage de la pièce brute sont effectués suivant les formules:

a) (133) pour des surépaisseurs asymétriques lors de l'exécution des plans:

$$z_{b_{\min}} = (H_a + T_a) + (\rho_a + \varepsilon_B);$$

b) (135) pour des surépaisseurs symétriques lors de l'usinage des surfaces de révolution:

$$2z_{b_{\min}} = 2\left[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_B^2}\right],$$

où $z_{b\min}$ est la surépaisseur minimale d'usinage (par côté) rapportée à la cote minimale de l'ébauche pour des surfaces extérieures, et à la cote maximale de l'ébauche, pour des surfaces intérieures;

H_a, la hauteur (H_{moy}) des rugosités superficielles;

T_a, la profondeur de la couche superficielle défectueuse;

$\overline{\rho}_a$, la valeur totale des défauts de positions de la surface en œuvre;

ε_B, le défaut de mise en place avec dégauchissage de l'ébauche pour la reprise en cours.

La valeur de la surépaisseur nominale $z_{b_{nom}}$ est calculée suivant les formules (115), (120), (125) et (130).

Les ébauches employées généralement dans les travaux unitaires sont a) des laminés, b) des pièces fabriquées par forgeage libre, c) des pièces obtenues par le moulage en sable, les moules étant exécutés à la main ou par sablage.

Dans les petites séries, on met en œuvre des pièces formées dans des matrices volantes, des pièces obtenues par le moulage en sable, les moules étant exécutés à la machine et par la coulée centrifuge.

Pour calculer les surépaisseurs d'usinage des pièces forgées, on peut recommander les données suivantes.

Valeurs de $(H_a + T_a)$ *pour les pièces brutes.*

Pour les laminées $H_a + T_a = 0{,}3$ mm.

Pour les pièces exécutées par forgeage libre:

Cote transversale, mm	de 50 à 180	de 180 à 500	de 500 à 1000	de 1000 à 2000
$H_a + T_a$, mm	2	3	4	5

Pour les moulages en sable, les moules étant exécutés à la main:

Cote maximale, mm	Jusqu'à 500	de 500 à 1250	de 1250 à 3150	de 3150 à 6300	de 6300 à 10 000
$H_a + T_a$, mm	0,8	0,9	1,0	1,5	2,0

Pour la surface supérieure en position lors de la coulée, on augmente $(H_a + T_a)$ pour obtenir après le façonnage une surface de qualité imposée. Cet excès de la valeur de $(H_a + T_a)$ pour la partie supérieure de l'ébauche en position conforme à la coulée du métal dans le moule varie en fonction des dimensions de 0,5 à 3 mm pour des pièces en fonte grise, et de 0,5 à 7 mm pour des pièces de forme en acier; il est établi suivant les normes homologuées.

Valeurs des défauts de positions relatives des surfaces des ébauches brutes.

Pour les laminés, les défauts de positions relatives se traduisent par des courbures. Les normes admettent une courbure locale de 5 mm par 1 m de longueur. Le dressage des ébauches mises à longueur réduit de la manière suivante la valeur de la courbure spécifique:

Diamètre de la barre, mm	Jusqu'à 30	de 30 à 80	plus de 80
Courbure spécifique Δ_c, mm/m . . .	1,0	0,8	0,5

Lors de l'usinage entre pointes des barres laminées, le défaut de centrage ρ_{ccn} est défini par la formule (139).

Pour les pièces obtenues par forgeage libre, les défauts de positions essentiels sont : la courbure pour les arbres, les barres, les poutres, les plaques et les disques ; les défauts de coaxialité pour les fusées des arbres ; l'excentricité des surfaces extérieures par rapport aux trous exécutés dans les disques, les manchons, les cylindres et autres ébauches à trous poinçonnés.

La courbure totale ρ_{ct} des laminés ou des ébauches des arbres, des barres et des poutres venues de fonderie est calculée d'après la formule

$$\rho_{ct} = \Delta_c L,$$

où Δ_c est la valeur spécifique de la courbure en mm/m (par 1 m de longueur) ;

L, la longueur totale de l'ébauche laminée ou de la pièce venue de forge, en m.

Lors de l'usinage des arbres à fusées, des poutres à ailes et d'autres pièces analogues, la nécessité apparaît de définir la courbure locale au droit de la fusée ou de l'aile ; on fait appel alors à la formule (80) :

$$\rho_{cl} = \Delta_c 2 l_c,$$

où l_c est la distance de la section pour laquelle on calcule la courbure jusqu'à la face la plus proche ; la courbure spécifique des arbres, des barres et des poutres $\Delta_c = 0{,}4$ à 1,0 mm/m, suivant la rigidité de la pièce forgée.

Le centrage des ébauches obtenues par forgeage libre s'effectue généralement pendant le traçage ; dans ce cas, $\rho_{ccn} = 0{,}25\ \delta_{éb}$, où $\delta_{éb}$ est la tolérance sur la cote diamétrale de la plus grande fusée de la pièce brute.

Pour les ébauches des arbres à fusées, le défaut de coaxialité des fusées peut être adopté, avec une précision suffisante pour des buts pratiques, égal à 0,25 de la tolérance sur la cote diamétrale de la fusée voisine plus grande. Le défaut de coaxialité maximal des fusées ρ_f peut être calculé suivant la formule

$$\rho_f = 0{,}25 \delta_{max},$$

où δ_{max} est la tolérance sur la cote de la plus grande fusée.

L'addition de la courbure ρ_{ct} et du défaut de coaxialité des fusées ρ_f se fait suivant la règle du rectangle :

$$\rho_a = \sqrt{\rho_{ct}^2 + \rho_f^2}$$

Le calcul des surépaisseurs des surfaces de base (plans suivant la hauteur d'une plaque, faces des disques) doit tenir compte de la courbure totale ρ_{ct} qui est définie par la formule:

$$\rho_{ct} = \Delta_c L$$

ou

$$\rho_{ct} = \Delta_c D,$$

où Δ_c est la valeur de la courbure spécifique en mm/m;
L, la longueur de la plaque en m;
D, le diamètre du disque en m.

La courbure spécifique des tôles, plaques et disques $\Delta_c = 1$ à 3 mm/m, suivant la rigidité de l'ébauche.

L'excentricité des trous poinçonnés lors du forgeage libre par rapport aux surfaces extérieures ρ_{exc} peut être égale à 0,25 de la tolérance δ_d sur la cote du trou pratiqué.

La tolérance sur la cote du trou poinçonné est calculée d'après la formule:

$$\delta_d = 0{,}7\,(d - d_{poinç}), \qquad (140)$$

où d est le diamètre du trou (cote imposée par le dessin de la pièce);
$d_{poinç}$, le diamètre du poinçon.

Les diamètres des poinçons sont choisis en fonction des trous à percer suivant les normes homologuées.

Pour les pièces coulées, le gauchissement et le déplacement des noyaux générateurs des trous et des surfaces intérieures sont les défauts de position essentiels. Le gauchissement d'une pièce brute ρ_g est donné par la formule (83):

$$\rho_g = \Delta_g L,$$

où Δ_g est la valeur spécifique du gauchissement, en mm/m;
L, la cote maximale de la surface usinée en m.

La valeur spécifique du gauchissement des pièces coulées atteint les grandeurs suivantes en fonction de la rigidité: pour les plaques et les disques, $\Delta_g = 0{,}7$ à 3 mm/m; pour les corps, $\Delta_g = 0{,}7$ à 1,0 mm/m.

En calculant les surépaisseurs d'usinage des pièces coulées comportant des trous, il faut tenir compte du déplacement de l'axe du trou par rapport aux surfaces de référence. La valeur du déplacement ρ_d est prise égale à la tolérance sur la cote nominale définissant la distance de l'axe du trou à la surface de référence. Lors du positionnement par le trou brut, la surépaisseur d'usinage de la surface en œuvre tient compte de ρ_d. Lors de l'usinage d'un trou brut à partir d'une surface d'appui associée, c'est la surépaisseur d'usinage du trou qui doit rendre compte de la valeur de ρ_d.

Calcul des défauts de mise en place des ébauches lors de leur façonnage sur des machines-outils. Le déplacement de l'axe d'une ébauche exécutée à partir d'un laminé brut et fixée sur un mandrin trois mors à serrage concentrique est choisi suivant les données fournies par l'Annexe 1c.

Le défaut de dégauchissage ε_B des pièces fabriquées par forgeage libre ou moulées en sable à la main et fixées sur un mandrin ou un plateau est pour les diamètres de 180 à 500 mm $\varepsilon_B = 1$ mm, de 500 à 1000 mm $\varepsilon_B = 2$ mm, et de 1000 à 2000 $\varepsilon_B = 3$ mm.

Le défaut de mise en place des ébauches avec dégauchissage sur la table de la machine suivant le traçage est pour les ébauches aux dimensions inférieures à 3 m $\varepsilon_B = \pm 0,5$ mm, de 3 à 6 m $\varepsilon_B = \pm 1,0$ mm et plus de 6 m $\varepsilon_B = \pm 1,5$ mm. Si le dégauchissage se fait suivant les surfaces déjà usinées, il constitue pour les ébauches aux dimensions inférieures à 3 m $\varepsilon_B = \pm 0,1$ mm, de 3 à 6 m $\varepsilon_B = \pm 0,2$ mm, et plus de 6 m $\varepsilon_B = \pm 0,3$ mm [1].

Addition des défauts de positions relatives et du défaut de mise en place. Conformément à la formule (133), lors de l'exécution des plans, le défaut de perpendicularité ρ_{dp} et le gauchissement ρ_g s'ajoutent au défaut de mise en place ε_B suivant la règle d'addition arithmétique.

Les défauts de positions relatives des surfaces de révolution s'ajoutent conformément à la formule (135) au défaut de mise en place suivant la règle du rectangle:

$$\sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_B^2}; \qquad \sqrt{\rho_{exc}^2 + \varepsilon_B^2}.$$

Les tolérances sur les cotes des pièces brutes sont choisies suivant les normes respectives.

Rôle des défauts pour l'exécution des pièces sur des machines-outils. Pour calculer les surépaisseurs d'usinage des laminés, il est recommandé de choisir pour le dégrossissage la 7e à la 5e classe de précision et la 2e à la 3e classe d'état de surface; pour la semi-finition, la 5e à la 4e classe de précision et la 3e à la 5e classe d'état de surface; pour la finition, la 4e à la 3e classe de précision et la 5e classe d'état de surface.

L'usinage des pièces fabriquées par forgeage libre implique la 11e ou la 10e classe de précision pour le dégrossissage, la 9e à la 8e classe de précision pour l'ébauchage, la 7e à la 5e classe de précision pour la semi-finition et la 4e à la 3a classe de précision pour la finition.

Si après le dégrossissage il reste des surfaces brutes, $(H_a + T_a)$ est pris suivant la pièce brute; dans le cas où les surfaces brutes

[1] Voir Annexe 2.

n'existent pas, $(H_a + T_a)$ est pris suivant la 1re classe d'état de surface; après l'ébauchage et la semi-finition, sa valeur doit correspondre à la 1re ou à la 2e classe d'état de surface et après la finition, à la 4e ou à la 5e classe d'état de surface.

Pour l'usinage la précision des moulages en sable exécutés à la main est choisie : pour le dégrossissage, de la 10e à la 9e classe; pour l'ébauchage, de la 8e à la 7e classe; pour la semi-finition, de la 7e à la 5e classe, et pour la finition, de la 4e à la 3a classe, et, respectivement, la 1re, de la 1re à la 2e, de la 2e à la 4e, et de la 5e à la 6e classe d'état de surface.

Lorsque l'exécution de la cote se fait à partir des surfaces de référence brutes, la tolérance est calculée suivant la formule

$$\delta = \frac{\delta_{éb} + \delta_{us}}{2}, \tag{141}$$

où $\delta_{éb}$ est la tolérance sur la cote de l'ébauche brute;

δ_{us}, la tolérance sur la même cote, observée en cours d'usinage à partir d'une surface d'appui finie.

Lors de l'usinage de la fonte grise et des métaux non ferreux, après la première reprise on pose $T_a = 0$.

Indépendamment de l'ébauche de départ, l'usinage fin avec des outils tranchants assure la 3e ou la 2a classe de précision et la 7e ou la 8e classe d'état de surface.

Dans les conditions d'obtention individuelle des cotes la rectification se fait en deux reprises (préalable et finition) sans remplacer la meule. La rectification fine s'effectue avec des meules d'un numéro de grain accru. La rectification préalable permet d'enlever environ 70 % de la surépaisseur prévue, et la finition, 30 %.

La rectification permet d'obtenir la 3e ou la 2e classe de précision et la 6e ou la 8e classe d'état de surface. La rectification fine assure la 2e ou la 1re classe de précision et la 8e ou la 10e classe d'état de surface.

Les défauts de positions résiduels après chaque passe de l'outil sont définis par les formules (52) et (52a).

Le calcul des surépaisseurs prévues pour la reprise en cours d'exécution de la gamme d'usinage de grosses pièces unitaires doit rendre compte des défauts de positions produits par l'exécution de la reprise précédente par suite des défauts de la géométrie de la machine.

Les défauts nouvellement apparus en cours d'exécution ainsi que les défauts de positions résiduels qui apparaissent en même temps que les précédents s'ajoutent ou se compensent dans telle ou telle mesure. C'est pourquoi l'addition de ces deux types de défauts se fait algébriquement, en tenant compte du signe.

Lors du façonnage d'un plan de base d'une plaque, l'exemple d'une additivité des défauts est fourni par le gauchissement résiduel de la pièce et l'accroissement de la longueur à l'un de ses bouts, résultant du défaut de parallélisme de sa surface d'appui dû au défaut de la géométrie de la machine. Le résultat de ces défauts est défini par leur somme. Après avoir calculé la valeur du gauchissement résiduel à l'aide de la formule (52) ou (52a) et celle de l'accroissement de la cote par suite du défaut géométrique de la machine (qui est à l'origine du défaut de parallélisme du plan usiné par rapport à la surface d'appui) à l'aide de la formule (54), ces deux valeurs sont additionnées pour donner le défaut résultatif qui intervient lors du calcul de la surépaisseur prévue pour l'usinage ultérieur.

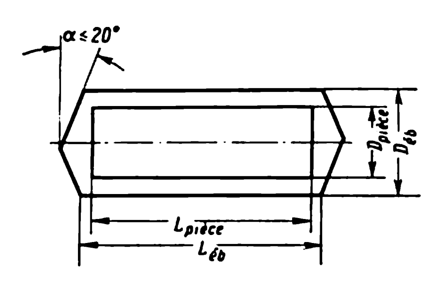


Fig. 188. Dépouilles de tronçonnage d'une pièce fabriquée par forgeage libre; $D_{éb}$ et $L_{éb}$, D_p et L_p — respectivement diamètre et longueur de la pièce forgée et de la pièce finie

A titre d'exemple de défauts de positions qui se compensent plus ou moins on peut citer ceux apparus lors du dressage de la face d'un arbre: ce sont sa convexité résiduelle résultant d'une dépouille de tronçonnage sous un angle α (fig. 188) et sa concavité due au défaut de perpendicularité du mouvement transversal du chariot par rapport à l'axe de rotation de la broche.

Le calcul du défaut de perpendicularité résiduel de la face par rapport à l'axe d'un arbre se fait à l'aide de la formule (52); on pose que l'angle de dépouille d'une ébauche brute $\alpha \leqslant 20°$.

Le calcul des surépaisseurs prévues pour les reprises réalisées après un traitement thermique doit tenir compte de la courbure résultant de ce traitement. La valeur spécifique de la courbure est choisie:

a) pour les barres laminées d'un diamètre jusqu'à 30 mm, $\Delta_c = 0{,}5$ mm/m; de 30 à 80 mm, $\Delta_c = 0{,}4$ mm/m; et plus de 80 mm, $\Delta_c = 0{,}3$ mm/m;

b) pour les pièces exécutées par forgeage libre, $\Delta_c = 0{,}3$ à 0,5 mm/m, en fonction de la rigidité.

La fixation de l'ébauche sur un mandrin trois mors à serrage concentrique par une surface préalablement usinée donne lieu aux défauts de mise en place suivants:

Diamètre de la surface serrée, mm	Jusqu'à 50	de 50 à 120	de 120 à 260	de 260 à 500
Défaut de mise en place, mm	0,1	0,15	0,20	0,25

Lors de la fixation d'une ébauche par une surface finie, le défaut de mise en place diminue de moitié.

Pour le tournage, le défaut de dégauchissage suivant une surface usinée ε_B varie de 0,03 à 0,5 mm, en fonction du mode d'ablocage.

Pour la mise en place des ébauches avec dégauchissage sur la table de la machine, on prend les valeurs du défaut de dégauchissage données par l'Annexe 2.

Faisons quelques calculs à titre d'illustration.

Exemple 1. Le dimensionnement de l'arbre lisse à exécuter est imposé par le dessin: diamètre $D = 350_{-0,215}$ et longueur $L = 3000$ mm.

La surépaisseur minimale nécessaire pour le dégrossissage est donnée par la formule (135);

$$2z_{b_{min}} = 2\left[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_B^2}\right].$$

Posons $H_a + T_a = 3$ mm (p. 293). La courbure de l'ébauche brute

$$\rho_{ct} = \Delta_c L = 0,8 \cdot 3 = 2,4 \text{ mm (p. 294).}$$

Le défaut de centrage

$$\rho_{cen} = 0,25\delta = 0,25 \cdot 20 = 5 \text{ mm.}$$

La valeur totale

$$\rho_a = \sqrt{2,4^2 + 5^2} = 5,55.$$

Lors de la mise en place de l'arbre sur une machine dans le but de réaliser son usinage, une de ses extrémités est serrée sur un mandrin, et l'autre est soutenue par la contre-pointe de la contre-poupée. Dans ces conditions, le défaut de mise en place est défini par celui de dégauchissage réalisé en serrant l'extrémité avant de l'arbre sur le mandrin.

Posons que le défaut de dégauchissage ε_B lors de la fixation de l'extrémité avant de l'arbre sur un mandrin $\varepsilon_B = 1$ mm.

Alors la surépaisseur prévue pour le dégrossissage vaut

$$2z_{b_{min}} = 2\left(3 + \sqrt{5,55^2 + 1^2}\right) \approx 17,3 \text{ mm.}$$

Une telle surépaisseur rend utile la division du travail préalable en ébauchage avec une surépaisseur de 12 mm sur le diamètre, et en semi-finition avec une surépaisseur de 5,3 mm (posons que l'ébauchage enlève 0,7 de la surépaisseur totale, et la semi-finition, 0,3).

La courbure résiduelle est donnée par la formule (52):

$$\rho_{rés} = W_{syst} A\left[t^x - (t - \rho_{ct})^x\right].$$

La flexibilité maximale de l'arbre ne dépassant pas 0,04 μ/kg, posons

$$W_{syst} = W_m + W_{éb} = 1 \text{ μ/kg.}$$

Pour l'ébauchage et la semi-finition, il vient

$$A = C_y a^y H_B^n = 0,0027 \cdot 2^{0,75} \cdot 200^2 \approx 181,5.$$

La surépaisseur d'ébauchage suivant le diamètre étant de 12 mm, on obtient la profondeur de coupe $p = 6$ mm, donc

$$\rho'_{rés} = 1 \cdot 181,5\left[6^{0,9} - (6 - 5,55)^{0,9}\right] = 0,264 \text{ mm.}$$

Le coefficient de précision pour l'ébauchage

$$K'_{pr}=\frac{0,264}{5,55}\approx 0,05.$$

Le défaut de mise en place résiduel

$$\varepsilon'_{B_{rés}}=K'_y\varepsilon_B=0,05\cdot 1=0,05 \text{ mm}.$$

Après la semi-finition on obtient :

$$\rho'_{rés}=1\cdot 181,5\,[2,65^{0,9}-(2,65-0,26)^{0,9}]\approx 53\ \mu ;$$

$$K''_{pr}=\frac{53}{264}=0,2 ;$$

$$\varepsilon''_{B_{rés}}=0,2\cdot 0,05=0,001 \text{ mm}.$$

Compte tenu de la déformation de l'ébauche de l'arbre résultant de la redistribution des contraintes internes par suite de l'enlèvement de la couche supérieure sollicitée, adoptons pour l'usinage ultérieur la valeur obtenue de $\rho'_{rés}$ en y affectant le coefficient 2.

La surépaisseur de finition

$$2z_{b_{\min}}=2\,[(50+50)+\sqrt{(2\cdot 53)^2+1^2}]=413\approx 0,41 \text{ mm}.$$

La surépaisseur d'usinage totale

$$z_{t_{\min}}=12+5,3+0,41=17,71 \text{ mm}.$$

Suivant les normes, la surépaisseur nominale pour l'usinage d'un tel arbre est $2z_{nom}$ = 28 mm. Après avoir calculé suivant la formule (125) la surépaisseur nominale à partir de la surépaisseur minimale, on obtient

$$2z_{t_{nom}}=2z_{t_{\min}}+H_{éb}-H_{pièce}=17,71+10-0,215\approx 27,5 \text{ mm} ;$$

dans le cas considéré, on obtient une bonne coïncidence entre l'épaisseur calculée et celle donnée par les normes.

Exemple 2. Le diamètre du disque à façonner $D = 750_{-0,5}$ mm, sa hauteur $H = 250_{-0,3}$ mm; il comporte un trou central d'un diamètre $d =$ $= 250^{+0,185}$ mm. L'ébauche est obtenue par forgeage libre.

Pour le calcul de la surépaisseur d'usinage préalable on pose $H_a + T_a =$ $= 4$ mm (p. 293).

L'excentricité de la surface extérieure par rapport au trou poinçonné

$$\rho_{exc}=0,25\delta_d ;\quad \delta_d=0,7\,(250-200)=35 \text{ mm} ;$$

$$\rho_{exc}=0,25\cdot 35\approx 9 \text{ mm}.$$

Comme la mise en place se fait avec dégauchissage suivant la surface extérieure et le trou, le défaut de position relative est partagé entre la surface extérieure et le trou, en rapportant à chacun d'eux 4,5 mm.

Posons que l'erreur de mise en place de l'ébauche avec dégauchissage sur le plateau $\varepsilon_B = 2$ mm (p. 296).

La surépaisseur d'ébauchage pour la surface extérieure:

$$2z_{b_{\min}}=2\,[4+\sqrt{4,5^2+2^2}]=17,8\approx 18 \text{ mm}.$$

Pour calculer la surépaisseur de finition, calculons le défaut de position résiduel $\rho_{rés}$ et le défaut de mise en place avec dégauchissage après l'ébau-

chage. Posons la flexibilité de la machine $W_m = 1 \mu/\text{kg}$; en prenant alors la valeur $A = 181{,}5$, obtenue dans le premier exemple, on obtient

$$\rho_{rés_{exc}} = 1 \cdot 181{,}5 [9^{0,9} - (9-4{,}5)^{0,9}] = 608 \ \mu \approx 0{,}61 \ \text{mm}.$$

Le coefficient de précision

$$K_{pr} = \frac{0{,}61}{4{,}5} = 0{,}136.$$

$$\varepsilon_{B_{rés}} = 0{,}136 \cdot 2 = 0{,}272 \ \text{mm} \approx 0{,}27 \ \text{mm}.$$

Adoptons après ébauchage $H_a + T_a = 0{,}4$ mm.
La surépaisseur de finition vaut alors :

$$2z_{b_{\min}} = 2 [0{,}4 + \sqrt{0{,}61^2 + 0{,}27^2}] = 2{,}2 \ \text{mm}.$$

La surépaisseur totale pour l'exécution de la surface de révolution extérieure

$$2z_{b_{\min}} = 18 + 2{,}2 = 20{,}2 \ \text{mm}.$$

La surépaisseur d'ébauchage des faces

$$z_{b_{\min}} = (H_a + T_a) + (\rho_g + \varepsilon_B) = 4 + (2{,}25 + 2) \approx 8{,}3 \ \text{mm} ;$$

$$\rho_g = \Delta_g D = 3 \cdot 0{,}75 = 2{,}25 \ \text{mm}.$$

Pour réduire le gauchissement résiduel du disque usiné effectuons l'ébauchage avec une surépaisseur de 6 mm et la semi-finition avec une surépaisseur de 2,3 mm.

Après l'ébauchage, on obtient

$$\rho'_{rés} = 1 \cdot 181{,}5 [6^{0,9} (6 - 2{,}25)^{0,9}] \approx 309 \ \mu \approx 0{,}31 \ \text{mm} ;$$

$$K'_{pr} = \frac{0{,}31}{2{,}25} = 0{,}138 ;$$

$$\varepsilon'_{B_{rés}} = 0{,}138 \cdot 2 = 0{,}276 \approx 0{,}28 \ \text{mm}.$$

Après la semi-finition,

$$\rho''_{rés} = 1 \cdot 181{,}5 [2{,}3^{0,9} - (2{,}3 - 0{,}31)^{0,9}] = 45 \ \mu ;$$

$$K''_{pr} = \frac{45}{309} = 0{,}146 ;$$

$$\varepsilon_{B_{rés}} = 0{,}146 \cdot 0{,}28 = 0{,}0409 \ \text{mm} \approx 40 \ \mu.$$

Pour compenser le gauchissement résiduel et la déformation du disque résultant de la perturbation de l'équilibre des contraintes internes provoquée par l'enlèvement des couches superficielles sollicitées, en calculant la surépaisseur de finition, doublons pour l'ébauchage et la semi-finition le défaut de position ρ''_g :

$$\rho_a = 2\rho''_g = 2 \cdot 45 = 90 \ \mu.$$

La surépaisseur de finition

$$z_{b_{\min}} = (100 + 100) + (90 + 40) = 330 \ \mu.$$

La surépaisseur totale pour l'usinage de chaque face

$$z_{t_{\min}} = 6 + 2{,}3 + 0{,}33 = 8{,}63 \approx 9 \ \text{mm}.$$

La surépaisseur d'usinage préalable du trou

$$2z_{b_{\min}} = 2\left[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_{exc}^2 + \varepsilon_B^2}\right] = 2\,(4 + \sqrt{4{,}5^2 + 2^2}) = 17{,}8 \approx 18 \text{ mm}.$$

La surépaisseur ainsi obtenue rend avantageuse sa division en surépaisseur d'ébauchage et surépaisseur de semi-finition dans le rapport suivant: $0{,}7 \cdot 18 \approx 13$ mm pour l'ébauchage et $0{,}3 \cdot 18 \approx 5$ mm pour la semi-finition.

Après l'ébauchage, on obtient

$$\rho'_{exc} = 1 \cdot 181{,}5\,[6{,}5^{0{,}9} - (6{,}5 - 4{,}5)^{0{,}9}] \approx 640\ \mu = 0{,}64 \text{ mm}.$$

Donc, lors de l'ébauchage le coefficient de précision

$$K'_{pr} = \frac{0{,}64}{4{,}5} = 0{,}14.$$

En utilisant le coefficient de précision, on obtient

$$\varepsilon_{B_{rés}} = K''_{pr}\varepsilon_B = 0{,}14 \cdot 2 = 0{,}28 \text{ mm}.$$

Après la semi-finition

$$H_a + T_a = 0{,}2 \text{ mm}$$

$$\rho''_{exc} = 1 \cdot 181{,}5\,[2{,}5^{0{,}9} - (2{,}5 - 0{,}64)^{0{,}9}] \approx 91\ \mu.$$

Le coefficient de précision pour la semi-finition

$$K'_{pr} = \frac{91}{640} = 0{,}14.$$

Le défaut de mise en place résiduel

$$\varepsilon''_B = 0{,}14 \cdot 0{,}28 = 0{,}04 \text{ mm}.$$

La surépaisseur de finition

$$2z_{b_{\min}} = 2\,[(100 + 100) + \sqrt{91^2 + 40^2}] = 607\ \mu \approx 0{,}61 \text{ mm}.$$

La surépaisseur totale pour l'usinage du trou

$$z_{t_{\min}} = 13 + 5 + 0{,}6 = 18{,}6 \text{ mm}.$$

Pour confronter les surépaisseurs calculées avec celles prévues pour de telles pièces par les normes, calculons les surépaisseurs nominales à partir des surépaisseurs minimales:

a) pour la surface de révolution extérieure

$$2z_{t_{nom}} = 20{,}2 + 10 - 0{,}5 \approx 30 \text{ mm};$$

suivant les normes, la surépaisseur prévue pour le diamètre est de 31 mm, c'est-à-dire qu'elle n'est que de 1 mm plus grande; la coïncidence est donc bonne;

b) pour les faces

$$2z_{t_{nom}} = 2 \cdot 9 + 10 - 0{,}3 \approx 28 \text{ mm};$$

suivant les normes, la surépaisseur est de 30 mm, c'est-à-dire de 2 mm plus grande suivant la hauteur H (1 mm par côté);

c) pour le trou central

$$2z_{t_{nom}} = 18{,}6 + 18 - 0 = 36{,}6 \text{ mm} \approx 37 \text{ mm};$$

suivant les normes, l'exécution d'un trou de 250 mm de diamètre se fait par un poinçon normalisé $d_{poinç}$ = 200 mm, ce qui assure une surépaisseur d'usi-

nage suffisante pour les conditions imposées. Ainsi, la coïncidence des surépaisseurs calculées et normalisées est bonne.

Exemple 3. Calculons la surépaisseur pour l'exécution de la surface supérieure d'un corps en fonte grise haut de 400 mm, large de 350 mm et long de 800 mm.

Posons $H_a + T_a = 0{,}9$ mm (p. 293).

Le gauchissement de la pièce brute suivant la surface supérieure à usiner

$$\rho_g = \Delta_g L = 1 \cdot 0{,}8 = 0{,}8 \text{ mm (p. 296).}$$

Le défaut de mise en place de l'ébauche pour l'usinage sur une machine-outil avec dégauchissage suivant le traçage $\varepsilon_B = 1$ mm (Annexe 2).

Lors de la coulée, la surface à usiner se trouve en bas. La finition du plan doit observer la cote $H = 400_{-0{,}25}$ mm.

La surépaisseur d'usinage préalable

$$z_{b\,\min} = 0{,}9 + (0{,}8 + 1) = 2{,}7 \text{ mm.}$$

Cette surépaisseur est enlevée par ébauchage.

Pour calculer la surépaisseur de finition, posons $H_a = 150\,\mu$. Le gauchissement résiduel $\rho_{rés}$ après l'ébauchage est défini par la formule (52); posons $W_m = 1\,\mu$/kg et calculons le coefficient A :

$$A = 0{,}13 \cdot 2^{0{,}75} \cdot 200^{1{,}3} = 214{,}2\,;$$

alors

$$\rho_{rés} = 1 \cdot 214{,}2\,[2{,}7^{0{,}9} - (2{,}7 - 0{,}8)^{0{,}9}] \approx 177\,\mu.$$

Compte tenu de la déformation de l'ébauche résultant de la perturbation de l'équilibre des contraintes internes provoquée par l'enlèvement par ébauchage de la couche supérieure sollicitée, prenons $\rho_{rés}$ affecté d'un coefficient 2.

Le défaut de dégauchissement avant le rabotage de finition $\varepsilon_B = 0{,}2$ mm (Annexe 2).

La surépaisseur de finition pour le rabotage

$$z_{b\,\min} = 150 + (2 \cdot 177 + 200) = 704\,\mu = 0{,}7 \text{ mm.}$$

La surépaisseur totale pour l'usinage de la surface supérieure

$$z_{t\,\min} = 2{,}7 + 0{,}7 = 3{,}4 \text{ mm}\,;$$

$$z_{t\,nom} = 3{,}4 + 3 - 0{,}25 \approx 6{,}15 \text{ mm} \approx 6{,}2 \text{ mm.}$$

Pour le cas considéré les normes prévoient une surépaisseur de 7 mm; elle est donc de 0,8 mm plus grande que celle donnée par les calculs, ce qui peut être considéré comme une bonne coïncidence. Par ailleurs, il faut noter que la surépaisseur calculée est très suffisante pour réaliser un usinage de qualité.

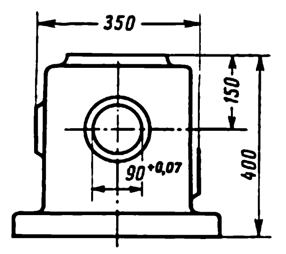


Fig. 189. Illustration du calcul de la surépaisseur d'usinage d'un trou brut de fonderie dans une pièce de support

Exemple 4. Calculons la surépaisseur prévue pour l'usinage dans le même corps d'un trou brut de fonderie d'un diamètre de $90^{+0{,}07}$ mm, défini par une distance de 150 mm du plan de référence supérieur et qui se trouve sur l'axe de symétrie de la pièce (fig. 189).

Les surépaisseurs d'usinage sont calculées d'après la formule (135):

$$2z_{b\,\min} = 2\left[(H_a + T_a) + \sqrt{\rho_a^2 + \varepsilon_B^2}\right].$$

Pour définir la surépaisseur d'usinage préalable, posons $H_a + T_a =$ $= 0{,}9$ mm (p. 293).

Le déplacement de l'axe du trou est établi suivant les cotes de référence d'après les écarts admissibles prévus pour les pièces coulées:

$$\rho_{dépl} = \sqrt{\rho_{150}^2 + \rho_{175}^2} = \sqrt{2{,}2^2 + 2{,}2^2} \approx 3{,}1 \text{ mm}.$$

Le défaut de mise en place avec dégauchissage suivant le traçage $\varepsilon_B = 1$ mm (Annexe 2).

La surépaisseur d'usinage préalable

$$2z_{b_{\min}} = 2\left(0{,}9 + \sqrt{3{,}1^2 + 1^2}\right) \approx 8{,}3 \text{ mm}.$$

Pour calculer la surépaisseur de finition, posons $H_a = 150$ μ, $A = 214{,}2$ (voir l'exemple 3).

Déterminons le déplacement résiduel $\rho_{rés}$ et le défaut de mise en place résiduel avec dégauchissage $\varepsilon_{B_{rés}}$:

$$\rho_{rés} = 1 \cdot 214{,}2\,[4{,}15^{0,9} - (4{,}15 - 3{,}1)^{0,9}] \approx 532 \text{ μ}.$$

Le coefficient de précision pour l'ébauchage

$$K'_{pr} = \frac{532}{3100} \approx 0{,}17;$$

$$\varepsilon'_{B_{rés}} = 0{,}17 \cdot 1 = 0{,}17 \text{ mm}.$$

La surépaisseur pour l'alésage de finition

$$2z_{b_{\min}} = 2\left(150 + \sqrt{532^2 + 170^2}\right) = 1460 \text{ μ} \approx 1{,}5 \text{ mm}.$$

Après l'alésage de finition, on a $H_a = 20$ μ.

Pour l'alésage de finition on trouve

$$A = 0{,}13 \cdot 0{,}1^{0,75} \cdot 200^{1,3} = 16{,}1.$$

Donc, après l'alésage de finition on obtient

$$\rho''_{rés} = 1 \cdot 16{,}1\,[0{,}75^{0,9} - (0{,}75 - 0{,}532)^{0,9}] \approx 9 \text{ μ};$$

$$K''_{pr} = \frac{9}{532} \approx 0{,}017;$$

$$\varepsilon_{B_{rés}} = 0{,}017 \cdot 0{,}17 = 0{,}003 = 3 \text{ μ}.$$

La surépaisseur à prévoir pour l'usinage définitif par alésage fin

$$2z_{b_{\min}} = 2\left(20 + \sqrt{9^2 + 3^2}\right) \approx 60 \text{ μ}.$$

La surépaisseur d'usinage totale

$$2z_{t_{\min}} = 8{,}3 + 1{,}5 + 0{,}06 = 9{,}86 \text{ mm};$$

$$2z_{t_{nom}} = 9{,}86 + 1{,}8 - 0{,}07 = 11{,}59 \text{ mm} \approx 12 \text{ mm}.$$

La confrontation de la surépaisseur calculée avec celle imposée par les normes témoigne d'une assez bonne coïncidence.

CHAPITRE V

Prescriptions fonctionnelles imposées par la fabrication de pièces mécaniques et des ensembles

§ 1. Prescriptions fonctionnelles imposées aux éléments de machines par le mode de leur assemblage

Prescriptions principales qui rendent possibles l'établissement des gammes de montage des ensembles et d'assemblage général à productivité élevée avec application des moyens de mécanisation et d'automatisation.

Eléments de machines estampés et soudés, leurs avantages et particularités. Classification technologique des éléments soudés. Prescriptions fonctionnelles générales imposées à la fabrication des éléments soudés.

L'organisation d'une machine est définie par sa destination et les conditions de son exploitation. La perfection de son organisation est caractérisée par le rendement économique de son fonctionnement et par la mesure dans laquelle sa caractéristique technique correspond au niveau actuel. Mais lors de l'étude de l'organisation d'une machine et de ses élements il faut en même temps tenir compte des prescriptions imposées par la fabrication. Ces prescriptions définissent la mise en œuvre des modes et des processus de fabrication très productifs en fonction du programme quantitatif de la fabrication des machines et des conditions de la production.

La mesure dans laquelle l'organisation d'une machine répond à ces prescriptions définit justement son aptitude à la fabrication.

Les prescriptions principales qui rendent possible l'établissement des gammes d'assemblage très efficaces peuvent être établies en partant des considérations suivantes.

Un des avantages technologiques de l'organisation d'une machine est la possibilité de l'assembler à partir d'ensembles montés d'avance; cette manière d'agir permet d'assembler simultanément les éléments de la machine et le produit fini, réduisant ainsi nettement la durée de l'assemblage général grâce à l'utilisation des ensembles déjà montés.

Ainsi, le cas où les organes d'une machine définis par leur destination fonctionnelle sont en même temps des ensembles technologiques, c'est-à-dire des éléments susceptibles d'être assemblés indépendamment des autres éléments, présente un avantage important du point de vue de la fabrication. Un tel ensemble est acheminé vers l'assemblage général du produit ou de l'ensemble d'ordre supérieur déjà monté et contrôlé, ayant subi au besoin même des essais. Dans ces conditions il est beaucoup plus aisé de prévenir

les défauts à l'échelon de l'assemblage général et, par conséquent, d'assurer une qualité d'assemblage bien meilleure.

Une telle organisation du produit permet d'effectuer l'assemblage non seulement sur un large front (assemblage simultané des ensembles et de toute la machine), mais encore accélère nettement l'établissement des gammes d'assemblage qui dans ces conditions, peuvent être rédigées également à une grande échelle à partir d'éléments isolés du produit, simultanément par plusieurs agents de méthodes affectés à l'assemblage.

Lorsque la machine ou l'ensemble à monter sont constitués non pas d'ensembles mais de groupes, c'est-à-dire d'éléments préalablement montés, mais qui doivent être démontés puis remontés pour être posés sur l'ensemble ou la machine à assembler, la durée de l'opération augmente considérablement, et dans certains cas rend difficile la synchronisation des opérations de montage lors du travail à la chaîne. Lorsque le montage des mécanismes se fait à partir des pièces mécaniques isolées, assemblées en cours de montage général, la qualité des assemblages et de leur réglage doit être vérifiée en cours de montage; le temps nécessaire pour l'exécution des opérations est alors plus grand et leur synchronisation plus difficile. Des constructions de ce type restreignent le front des travaux et augmentent la durée du montage.

Toutes ces considérations confirment les avantages technologiques des produits et des ensembles dont l'organisation autorise la division de leur assemblage en montage d'ensembles et en montage général. Cette division acquiert un intérêt particulier pour le montage à la chaîne; mais il faut retenir que dans les conditions d'une fabrication unitaire également, la division éventuelle de l'assemblage en montage des ensembles et montage général présente tous les avantages technologiques qui viennent d'être exposés.

L'utilisation maximale de pièces et d'ensembles normalisés permet de confier leur fabrication à d'autres entreprises. La standardisation des ensembles et des pièces isolées de produits élaborés au sein des branches industrielles ou des usines accroît la capacité des séries qu'elles fournissent et donc réduit la quantité de travail et le prix de revient. L'unification des éléments des pièces (queues d'arbres, cannelures, filets, rainures, plats, carrés, biseaux, etc.) permet d'unifier les réglages des machines et de réduire leur durée. C'est pourquoi la part spécifique des éléments normalisés d'un produit définit l'aptitude à la fabrication de la construction.

La précision imposée aux positions relatives des éléments d'un ensemble monté est plus facile à réaliser lorsque les surfaces de départ d'assemblage sont en même temps des surfaces de référence pour les surfaces de la pièce de départ associées à celles des pièces qui font partie de l'ensemble à monter. Cette affirmation est si

évidente qu'elle ne demande aucune explication. En effet, il a été déjà prouvé que la coïncidence des surfaces d'appui et de référence assure une précision d'usinage plus élevée. C'est pourquoi lors de l'étude des pièces mécaniques il faut s'efforcer de rendre possible l'utilisation de la surface de départ d'assemblage en tant que surface d'appui, car la coïncidence de ces deux surfaces ainsi que de la surface de référence assure, dans les mêmes conditions, une meilleure précision d'assemblage.

Indépendamment du type de fabrication pour laquelle la construction est étudiée, il faut prévoir pour l'assemblage une application éventuelle très large des moyens de mécanisation. Cette tâche implique: a) un accès libre et commode du matériel de montage mécanisé aux points d'assemblage ou de fixation des pièces et b) utilisation éventuelle des engins de manutention pour la pose des pièces et des ensembles sur le produit assemblé. Des pièces et des ensembles lourds doivent comporter, notamment, des boulons à œil spéciaux pour leur manutention en cours de montage et leur transport vers le lieu de montage. La mécanisation des travaux d'assemblage accroît nettement la productivité, qu'il s'agisse de la production en grande ou petite série ou de la fabrication unitaire.

L'automatisation constitue une mécanisation plus poussée des opérations d'assemblage; elle peut être appliquée avec succès non seulement dans la production de masse mais également dans les séries courantes; une telle automatisation accroît la productivité de 3 à 15 fois. Outre les prescriptions technologiques imposées à la construction de la machine par la mécanisation des opérations de montage, pour être possible l'automatisation impose une coordination rigoureuse des surfaces associées en cours de montage et par conséquent une solution correspondante du problème de la conception des surfaces de départ d'assemblage.

En résumé, les prescriptions fonctionnelles principales imposées par l'assemblage des éléments de machines peuvent être formulées de la manière suivante:

1) établir au possible des constructions composées d'ensembles assemblés séparément et posés sur le produit sans démontage et montage supplémentaires; une telle solution rend beaucoup plus aisé l'établissement d'une chaîne dans la production de masse et en grande série, alors que dans les conditions d'une fabrication unitaire, elle réduit la durée du cycle d'assemblage;

2) utiliser au maximum pour la construction étudiée des ensembles et pièces normalisés, et unifier les éléments des pièces particulières; l'observation de ces principes réduit la quantité de travail et diminue nettement la nomenclature des accessoires de fabrication;

3) retenir que la coïncidence des surfaces de départ d'assemblage, des surfaces d'appui et de référence améliore la précision d'usinage et de montage;

4) prévoir une large application des moyens de mécanisation des travaux d'assemblage qui élèvent la productivité quel que soit le type de production;

5) tenir compte du fait que dans les conditions d'une production de masse et en grande série l'automatisation de l'assemblage (de même que celle de la fabrication) multiplie la productivité du travail; il faut donc prévoir lors de l'étude des pièces une automatisation éventuelle des processus de production.

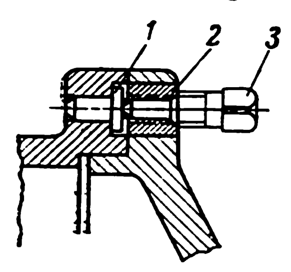


Fig. 190. Extracteur d'un couvercle monté par ajustement avec serrage:

1 — talon de butée pour la vis d'extraction; 2 — bague à filetage intérieur (jeu constitué par trois bagues réparties sur le pourtour de couvercle); 3 — vis d'extraction

Ces prescriptions essentielles dictées par l'allure de la fabrication peuvent être complétées par certaines stipulations particulières.

Pour élever la précision de pose de la pièce ou de l'ensemble et éliminer le temps supplémentaire pour le dégauchissage, il faut prévoir des éléments de centrage et de fixation spéciaux; ainsi, les bagues des paliers et les bagues de guidage logées dans un corps ou dans un support et fixées par filetage doivent avoir des collets, car un filetage n'assure pas un centrage judicieux; ces collets sont des surfaces d'appui qui déterminent la position géométrique de la pièce lors de sa mise en place; des surfaces analogues doivent être prévues pour les culasses comportant des trous pour des tiges. et d'autres pièces de ce genre.

Pour repousser les limites de tolérances sur les cotes des pièces usinées et réduire la quantité du travail d'ajustage, il faut prévoir au besoin des éléments compensateurs sous forme de joints, de bagues et d'entretoises extensibles.

Pour rendre possible le démontage éventuel en cours de montage ou d'exploitation, il faut prévoir pour les pièces liées par ajustement avec serrage des éléments permettant la mise en œuvre du matériel d'extraction (fig. 190).

Pour rendre plus facile le montage des pièces dont l'assemblage est assuré par plusieurs éléments de fixation, il faut éviter leur assemblage simultané et recourir à un assemblage successif-simultané. Pour prévenir, lors du montage, l'entaillage des surfaces d'ajustement, il faut leur donner une forme étagée. Ainsi, sur la figure 191, la largeur b du repos d'ajustement de l'œillet (collet) *1* est plus grande que la largeur b_1 de l'œillet *2*; lors du montage,

la bague sera donc guidée d'abord par l'œillet *1*, et ce n'est qu'après qu'elle s'engagera dans le trou de l'œillet *2*.

Les écrous fixés aux surfaces intérieures des pièces doivent être goupillés; lorsqu'ils sont fixés aux surfaces extérieures, ils peuvent comporter des rondelles élastiques.

Un des roulements montés sur le même arbre doit être bloqué dans le sens axial, les autres doivent pouvoir se déplacer dans ce sens pendant le montage; dans ces conditions, il est préférable que l'ajustement avec serrage assujetisse la bague intérieure à la pièce en rotation, alors que l'ajustement glissant se rapporte à l'assemblage de la bague extérieure avec la pièce fixe (fig. 192).

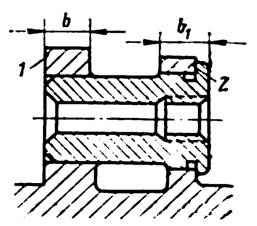


Fig. 191. Ajustement d'un axe suivant deux repos concentriques; pour réaliser l'assemblage successif-simultané, la cote *b* de l'œillet *1* doit être plus grande que la cote b_1 de l'œillet *2*.

L'observation des prescriptions exposées améliore non seulement l'aptitude de la construction à la fabrication, mais encore son aptitude au fonctionnement. L'aptitude des machines actuelles à la fabrication est accrue souvent par la mise en œuvre des éléments estampés et soudés, qui associent les avantages du travail des métaux en feuilles à ceux des assemblages par soudage.

Dans la majorité des cas, la conception des ensembles, quels que soient leur complexité et leur dimensionnement, peut prévoir,

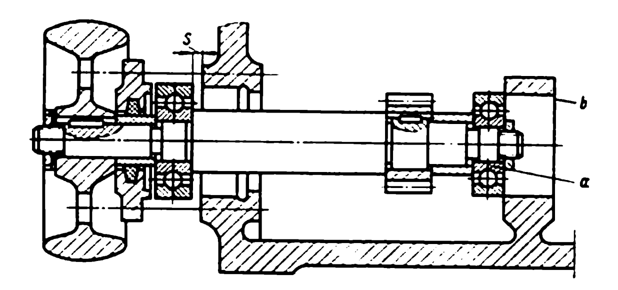


Fig. 192. Assemblage d'un ensemble à roulements:
a — ajustement avec serrage; *b* — ajustement glissant; *s* — jeu au début de l'exécution de l'assemblage

sans rendre la tâche trop difficile, le soudage des éléments dont les formes et les dimensions assurent l'obtention de la géométrie requise et qui sont déterminés par la gamme de fabrication. Les éléments des constructions complexes soudées peuvent être les plus variés: estampés, coulés et laminés. En remplaçant les moulages en acier par des ébauches estampées et soudées, le gain de poids

peut atteindre en moyenne 20 à 30 % ; pour la fonderie de fonte, le gain est encore plus important.

Les éléments estampés et soudés en tôles épaisses permettent de choisir les surépaisseurs nécessaires tout en observant les mêmes tolérances que dans le cas des ébauches fournies par l'estampage.

L'association éventuelle en un ensemble de pièces brutes et thermiquement traitées, ainsi que la possibilité d'utiliser des éléments en divers métaux permettent aux agents d'études et de méthodes d'obtenir des réalisations supplémentaires.

La classification technologique des constructions soudées compte trois groupes essentiels.

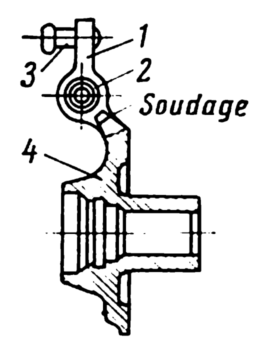
Le premier est constitué de pièces qui après le soudage ne subissent aucun usinage. Les constructions de ce groupe s'emploient généralement pour l'exécution des éléments de machines dont les cotes ne sont pas tolérancées. Mais il arrive que dans le cas d'un usinage des pièces avant le soudage et lorsque le soudage doit se faire avec la précision requise, ce type de construction peut être également utilisé pour l'exécution des éléments de machines tolérancées. Une telle structure de la gamme de fabrication est justifiée notamment dans les conditions de la construction mécanique lourde. Voici, par exemple, la façon dont on procède pour réduire la charge des machines uniques lors de la fabrication de la plate-forme tournante d'un excavateur à patins de 14 m^3; cette plate-forme est une construction métallique combinée à des pièces coulées, constituée de trois parties d'un poids total de 146 t et d'un encombrement de 20 × 12 m. La finition des bagues, éléments associés par des entraxes, se fait sur des machines usuelles à plateau carrousel. Pour respecter les entraxes imposés, la pose des bagues par soudage sur la plate-forme se fait sur un banc spécial comportant des supports et des socles en béton munis de mandrins pour assurer le calage des bagues pendant l'opération. Pour ne pas compromettre la forme des trous, les cordons de soudage en sont éloignés; à cet effet, on a augmenté le diamètre du flasque des bagues. Une telle structure de la gamme de fabrication a diminué de 28 jours le cycle de la fabrication, libéré l'aléseuse unique à broche de 250 mm de diamètre et réduit le volume des transports des éléments lourds de la construction dans les ateliers et entre les ateliers.

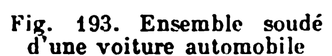
Le deuxième groupe réunit des constructions dont les surfaces d'ajustement ne subissent après le soudage que la finition par la coupe. L'usinage préalable des pièces s'effectue séparément sur des machines de modèle courant, alors que la finition se fait après soudage, permettant ainsi d'observer la position relative imposée des éléments constitutifs. Dans les conditions d'une construction mécanique lourde, une telle structure de la gamme de fabrication réduit nettement la charge de l'équipement unique qui délimite

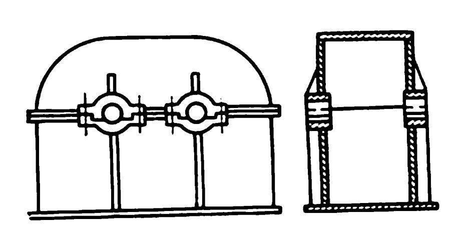
généralement le programme de production. Le calcul de la surépaisseur de finition des éléments d'une telle construction doit tenir compte des défauts de positions relatives qui peuvent apparaître en cours de soudage.

Le troisième groupe est constitué par des ébauches dont l'ébauchage et la finition par la coupe s'effectuent après le soudage. Cette structure de la gamme de fabrication convient pour des constructions dont l'usinage n'implique pas l'utilisation d'un équipement unique.

Les figures 193 à 195 donnent des exemples des éléments soudés. La figure 193 représente l'ensemble soudé d'une voiture automobile :




Fig. 193. Ensemble soudé d'une voiture automobile


Fig. 194. Corps soudé d'un démultiplicateur

la suspension du ressort *1* avec la bague en acier *2* emmanchée à force et l'axe *3* fini est soudée en bout au flasque de la trompette du demi-essieu arrière *4*. Une telle solution simplifie l'usinage des éléments de la construction soudée représentée sur la figure 193.

La figure 194 représente le corps soudé d'un démultiplicateur ; les paliers prévus pour recevoir les coussinets sont usinés avant le soudage ; leur alésage de finition s'opère sur le corps de démultiplicateur soudé après le fraisage des plans de conjugaison des deux parties du corps. Une telle structure de la gamme de fabrication réduit le cycle d'usinage sur de grosses machines-outils tout en assurant la précision imposée.

La figure 195 montre une poulie soudée ; le façonnage du moyeu et de la jante s'effectue après le soudage en assurant la concentricité imposée de ces éléments.

Le remplacement des bâtis coulés des machines-outils par des constructions estampées et soudées est tout aussi possible et avantageux. En remplaçant le bloc cylindre et la culasse coulés d'un moteur automobile par des pièces estampées, soudées et brasées,

on peut réaliser sur le poids de ces éléments un gain allant jusqu'à 30 % et sur la quantité de travail nécessaire pour leur fabrication, un gain de 26 %.

Voici les prescriptions de fabrication générales imposées à une construction soudée :

1. Lors de l'établissement du projet, tenir compte de la structure générale de la gamme de fabrication (groupe de classification de la construction soudée) et prévoir la mise en œuvre des procédés de soudage rationnels.

2. Réduire au minimum la quantité de travail de soudage et dans ce but, diminuer le nombre de pièces d'un ensemble à

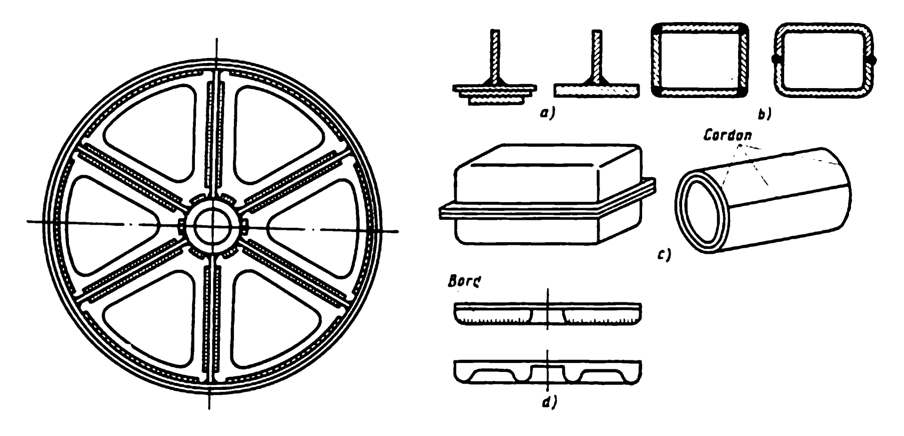


Fig. 195. Poulie soudée

Fig. 196. Procédés permettant de diminuer la quantité des travaux de soudage

souder en substituant un paquet de tôles minces par une seule tôle épaisse (fig. 196,*a*), en remplaçant le soudage par le cambrage (fig. 196,*b*), en utilisant lors de l'estampage le formage au lieu de découpage (fig. 196,*c*), en remplaçant les nervures de renforcement soudées par des nervures estampées (fig. 196,*d*), en choisissant des angles minimaux de chanfreinage des bords susceptibles d'assurer un soudage permettant d'obtenir un cordon continu sur toute l'épaisseur des pièces, ainsi que des assemblages sans chanfreinage, en prévoyant des assemblages sans recouvrement et avec une section des cordons minimale par suite de l'emploi des électrodes et des matériaux d'apport assurant une résistance poussée des assemblages.

3. Réduire au minimum les déformations et les contraintes engendrées par le soudage en a) réduisant le nombre de cordons et le volume du métal soudé; b) disposant symétriquement les cordons par rapport au centre de gravité de l'élément soudé;

c) interdisant des accumulations de cordons et leur intersection fréquente; d) répartissant les cordons de façon à permettre l'assemblage de l'ensemble avant le soudage.

4. Parer lors du soudage à l'endommagement des surfaces usinées en plaçant les cordons à une distance suffisante. Ainsi, le soudage de la bague de la figure 197,*a* faussera la forme du trou suivant

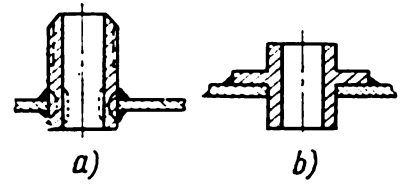


Fig. 197. Variantes de la fixation des bagues par soudage

le pointillé; la construction de la bague au flasque, représentée sur la figure 197,*b*, permet d'éloigner le cordon et d'éliminer la déformation du trou.

5. Répartir tous les cordons importants de façon à assurer leur accès une fois la fabrication de la construction achevée, et rendre possible ainsi leur révision et leur contrôle.

Nous n'avons examiné que les prescriptions fonctionnelles les plus générales imposées par la fabrication des éléments de machines. Certaines prescriptions particulières et les exemples n'ont été donnés qu'à titre d'illustration de telles ou telles considérations générales.

§ 2. Prescriptions fonctionnelles imposées aux pièces mécaniques par leur fabrication

Tendances générales de l'étude des pièces mécaniques imposées par leur fabrication.

Prescriptions de forme des ébauches et des pièces mécaniques fabriquées à partir de profilés, de produits d'étirage, par forgeage libre, par estampage à chaud sur des marteaux-pilons, presses et machines à forger horizontales, par forgeage à froid, travail des métaux en feuilles, fonderie.

Prescriptions fonctionnelles générales imposées par le mode d'usinage des pièces mécaniques. Prescriptions de fabrication imposées aux surfaces élémentaires des pièces mécaniques: surfaces de révolution extérieures, bouts, trous, surfaces filetées, plans, surfaces de forme, rainures et logements.

Dans de nombreux cas, l'application de tel ou tel mode de fabrication est définie par la construction des pièces mécaniques; il en est ainsi surtout pour les procédés de fabrication à productivité élevée.

Ainsi l'exécution d'une gamme de fabrication implique l'observation de certaines prescriptions fonctionnelles des pièces mécaniques. Cette observation élimine ou, au moins, réduit les difficultés de fabrication, diminue la durée de son cycle, accroît la productivité

du travail et réduit le prix de revient. De telles prescriptions sont imposées par la fabrication des pièces brutes, de même que par leur façonnage ultérieur.

L'étude d'une construction est une création. Il est donc impossible d'établir des règles générales valables pour tous les cas d'établissement des pièces mécaniques qui répondent aux prescriptions de fabrication, d'autant plus que la construction d'une pièce est définie par sa destination. La tendance générale devant présider à la solution de ce problème peut être formulée de la manière suivante.

La configuration d'une pièce doit présenter une combinaison de formes géométriques simples qui rendent possible l'application des modes de fabrication très productifs et le choix de points d'appui commodes et sûrs pour la mise en place de la pièce en cours d'usinage; lorsque les surfaces de la pièce ne répondent pas à ces prescriptions, il faut prévoir des éléments spéciaux (bossages, trous, etc.) pour assurer le positionnement et l'ablocage de l'ébauche; au besoin, ces éléments peuvent être supprimés après l'usinage.

La précision et l'état de surface imposés à la pièce doivent être rigoureusement établis en fonction de son aptitude au fonctionnement, car dans ce domaine les spécifications trop sévères obligent à introduire dans la gamme de fabrication des opérations supplémentaires, rendent plus long le cycle d'usinage, augmentent la quantité de travail et donc le prix de revient de la pièce.

L'application à une large échelle de la normalisation et de l'unification des pièces et de leurs éléments réduit la quantité de travail et diminue le prix de revient par suite de l'augmentation du volume des séries et de l'unification des réglages des machines.

Quant aux prescriptions imposées par les travaux d'ébauche, on peut recommander de se guider par les considérations suivantes.

Dans les conditions d'une production en grande série ou de masse, on a toute raison d'utiliser des profilés spéciaux et à bulbe, car ils diminuent nettement le volume d'usinage le rendant parfois tout à fait inutile. Dans plusieurs cas d'estampage, il est avantageux de mettre en œuvre des profilés spéciaux réduisant ainsi le nombre de gravures d'ébauche et élevant la productivité.

Pour obtenir des ébauches sous forme de profilés, ne nécessitant aucun usinage ultérieur, les ateliers de construction mécanique peuvent recourir à l'étirage à froid à partir des laminés courants.

Lors de l'exécution des ébauches par forgeage libre, il faut éviter les intersections entre éléments cylindriques (fig. 198), ainsi qu'entre éléments cylindriques et prismatiques (fig. 199), car de telles combinaisons géométriques sont difficiles à réaliser par ce procédé. Au besoin, il faut remplacer les formes de la figure 198 par celles de la figure 200, et de la figure 199 par celles de la figure 201. Il faut également éviter les sections comportant des nervures de renforcement.

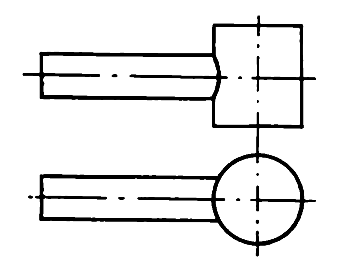


Fig. 198. Combinaison des éléments cylindriques difficile à réaliser par forgeage libre

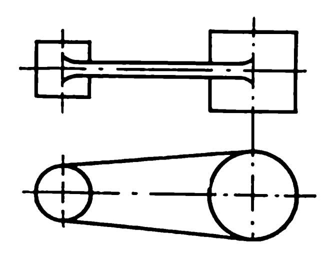


Fig. 199. Combinaison des éléments cylindriques et prismatiques difficile à réaliser par forgeage libre

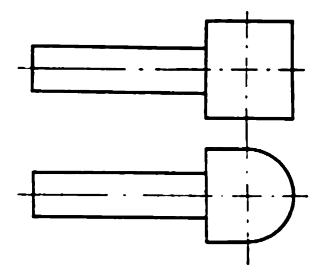


Fig. 200. Forme de l'ébauche admissible pour le forgeage libre

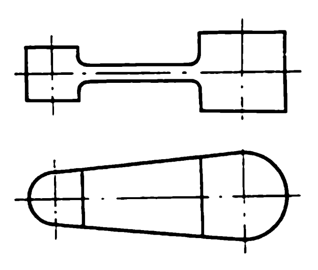


Fig. 201. Forme de l'ébauche admissible pour le forgeage libre

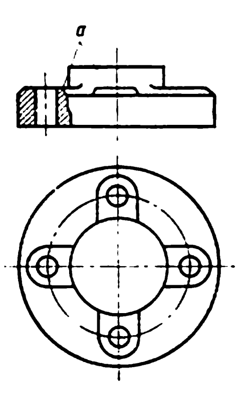


Fig. 202. Les bossages *a* rendent cette forme inacceptable pour le forgeage libre

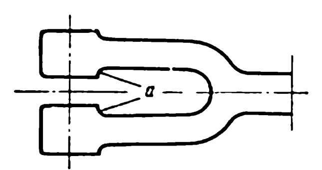


Fig. 203. Les saillies intérieures *a* compliquent nettement le forgeage libre

inadmissibles pour les pièces obtenues par forgeage libre, ainsi que la présence de toute sorte de bossages, de plats, de saillies sur les surfaces principales d'une pièce forgée (bossages *a* de la fig. 202, par exemple) et des saillies à l'intérieur de l'espace entre-fourches des pièces sous forme de chape (saillies *a* de la fig. 203, par exemple).

Dans le premier cas (fig. 202), les bossages doivent être remplacés par le fraisage cylindrique des trous; dans le deuxième (fig. 203), les saillies intérieures peuvent être suppléées par des saillies extérieures.

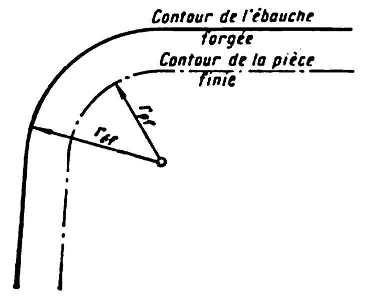


Fig. 204. Illustration du choix d'un rayon d'arrondi de l'ébauche usinée

Des cas sont fréquents où il est avantageux de remplacer une pièce complexe dont la forme se prête mal à la simplification par des ensembles composés d'éléments plus simples assemblés par soudage ou montage.

Pour la fabrication des pièces à partir des ébauches forgées ou estampées sur des marteaux-pilons et des presses, il est recommandé de se rapporter aux considérations suivantes.

La géométrie d'une pièce doit être conçue de façon à assurer son extraction libre de la matrice. Les surfaces latérales de la pièce de forge doivent comporter des dépouilles perpendiculaires à la surface du joint de la matrice. Les dépouilles sont choisies en fonction du rapport entre la hauteur de la face et sa largeur, de 5 à 15° pour les faces extérieures et de 7 à 15° pour les faces intérieures en cas d'absence des extracteurs; de 2 à 10° pour les faces extérieures et de 3 à 12° pour les faces intérieures, lorsque les extracteurs sont prévus.

Les surfaces brutes doivent être raccordées par un congé. Dans l'estampage à chaud les angles aigus sont inadmissibles. Les rayons de congé raccordant les angles rentrants doivent être plus grands que ceux de l'arrondi des angles saillants afin de prévenir le rebut lors de l'estampage et d'améliorer la tenue des matrices. La hauteur et le quotient de la hauteur par la largeur d'un élément définissent le choix du rayon entre 1,5 et 12,5 mm pour des angles saillants, et entre 4 et 45 mm, pour des angles rentrants.

Les surfaces usinées doivent être également raccordées par des rayons suffisants ou par un chanfrein, la condition ci-dessous étant impérative (fig. 204)

$$r_{pf} \geqslant r_{éf} - z_n,$$

où r_{pf} est le rayon d'arrondi de la pièce finie d'usinage;
$r_{éf}$, le rayon d'arrondi de l'ébauche forgée;
z_n, la surépaisseur d'usinage nominale.

Si cette condition n'est pas observée, on est obligé d'augmenter la surépaisseur désignée aux surfaces conjuguées de la pièce forgée pour assurer une surépaisseur normale permettant de réaliser le rayon de congé ou d'arrondi imposé à la pièce usinée.

Un chanfrein remplaçant l'arrondi doit être inscrit dans l'arc tracé avec le rayon de l'arrondi.

Une différence brusque entre les surfaces des sections de la pièce suivant sa longueur est à prohiber, car elle rend l'estampage plus difficile et conditionne l'apparition d'un rebut excédentaire dû à des serrages et au mauvais remplissage de l'empreinte.

Lorsqu'une pièce à estamper a des parois minces, ces dernières réduisent la tenue des matrices par suite d'un refroidissement rapide et d'une résistance accrue à la déformation ; le volume de rebut peut augmenter également par suite d'une déformation insuffisante. Les éléments minces adjacents au plan de joint augmentent nettement le débit du métal et le volume du rebut dû au mauvais remplissage de l'empreinte lors de l'estampage, ainsi qu'au cisaillement lors de l'ébavurage à froid.

La symétrie de la pièce par rapport au plan de joint et les dépouilles symétriques des parois en saillie simplifient l'exécution des matrices, l'opération de l'estampage, réduisent le rebut produit par le déplacement des matrices; une forme asymétrique et la différence entre les dépouilles par rapport au plan de joint engendrent une force qui tend à déplacer l'une des matrices par rapport à l'autre.

Les dimensions des bossages dans lesquels il faut percer des trous devant subir un usinage ultérieur sont calculées compte tenu de l'épaisseur minimale de la paroi après l'exécution du trou et du déplacement éventuel des matrices ; dans plusieurs cas, les bossages formant tonneau dans le sens du déplacement permettent d'obtenir après l'usinage du trou une épaisseur minimale.

Parfois il est plus avantageux de remplacer les pièces monobloc par des éléments soudés ; on réalise ainsi une économie de métal tout en simplifiant l'estampage ; tel est le cas, par exemple, de la pièce représentée sur la figure 205. Toutefois, dans chaque cas concret, il faut vérifier s'il est avantageux de procéder ainsi, car il arrive qu'une ébauche estampée monobloc soit d'une fabrication plus aisée et moins onéreuse (il en est ainsi, par exemple, du levier de la fig. 206).

Pour l'étude des pièces forgées sur des machines horizontales, il est recommandé de se rapporter aux considérations suivantes.

Les machines à forger horizontales permettent de fabriquer des pièces les plus différentes quant à leur configuration ; mais les pièces les plus convenables pour ce genre de travail sont constituées de corps de révolution d'une forme géométrique régulière comportant des flasques, des rebords, des trous débouchants et borgnes. Lorsque

les pièces comportent des trous débouchants ou borgnes, l'épaisseur des parois ne doit pas être inférieure à 0,15 de la cote diamétrale extérieure de la pièce.

Les rétrécissements dans la section longitudinale d'une pièce rendent plus difficile l'écoulement du métal lors de l'estampage; il convient donc de les éviter.

Les queues coniques compliquent également l'estampage, d'où la nécessité de les faire cylindriques.

Le volume des flasques aux extrémités ou au milieu d'une pièce ne doit pas dépasser celui de la tige de diamètre *d* et de longueur de 10 à 12 *d*.

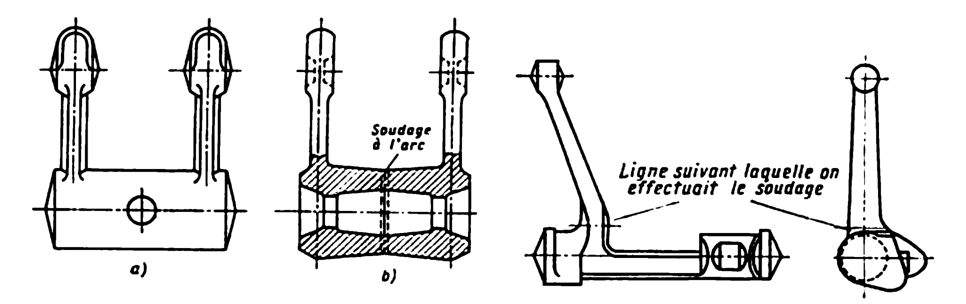


Fig. 205. Construction d'un même élément de machine: (*a*) entièrement estampé; (*b*) soudé

Fig. 206. Exemple de remplacement avantageux d'une construction soudée par une pièce estampée

Les dépouilles d'estampage des pièces de ce type peuvent être peu importantes: 0,5° sur les secteurs cylindriques de la pièce, d'une longueur supérieure à la moitié de leur diamètre, refoulés dans l'enceinte du poinçon; 0,5 à 1,5° sur les rebords formés dans les gravures circulaires des matrices; 0,5 à 3° sur les parois des trous borgnes d'une longueur de cinq diamètres et plus.

Les congés ou les arrondis raccordant une surface à l'autre doivent avoir un rayon de 1,5 à 2 mm.

Le refoulement à froid permet de fabriquer des pièces de boulonnerie et analogues en acier au carbone et en aciers alliés d'une dureté après recuit H_B 120 à 207.

Pour le refoulement à froid on emploie du fil ou de la barre calibrée. La forme des éléments refoulés doit être la plus simple possible et leur volume et diamètre minimaux. Pour élever la tenue des matrices, il ne faut pas pousser trop les tolérances des éléments à refouler sans une nécessité rigoureuse. Les congés et les arrondis raccordant une surface à l'autre doivent être exécutés avec un rayon d'au moins 0,2 mm.

Les pièces obtenues par le travail des métaux en feuilles doivent satisfaire aux prescriptions suivantes.

Les matériaux essentiels du travail des métaux en feuilles sont des bandes, des plats et des tôles. Il est d'usage d'employer des bandes

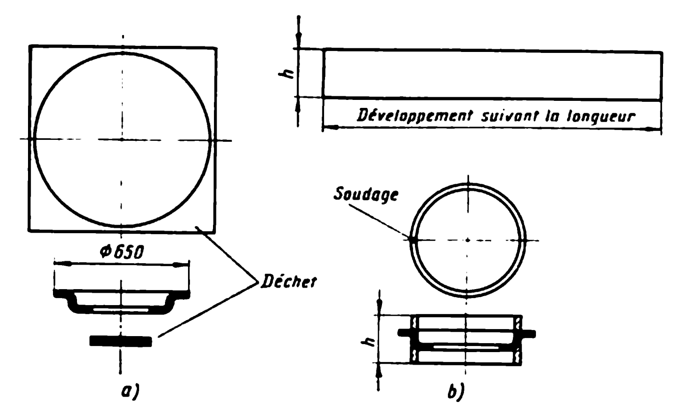


Fig. 207. Utilisation du soudage permettant de faire économie de métal:
a — pièce exécutée à partir d'une tôle (déchet important) ; *b* — pièce exécutée par soudage (sans déchet)

pour des pièces minces (2 à 2,5 mm d'épaisseur), des plats pour des pièces d'une épaisseur supérieure à 2,5 mm, les tôles dans les cas où les dimensions de la pièce ne s'inscrivent pas dans une bande ou un plat.

Les nervures de renforcement, les rabattements et d'autres éléments de construction obtenus par le travail des feuilles permet-

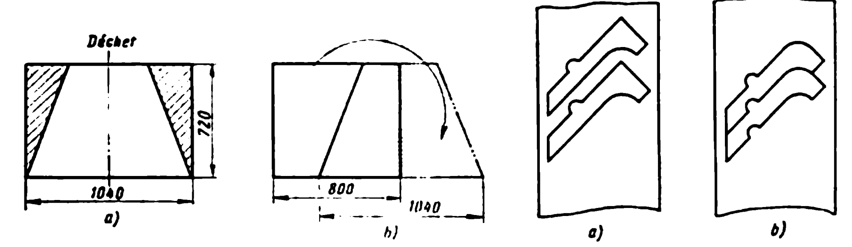


Fig. 208. Utilisation du soudage permettant de faire économie de métal:
a — ébauche monobloc d'une capote (déchet important) ; *b* — ébauche soudée (sans déchet)

Fig. 209. Pièce à configuration conforme (*b*) et non conforme (*a*) à un mode d'usinage avantageux

tent de diminuer l'épaisseur du matériau et de faire ainsi une économie de métal. Le soudage est également efficace sous ce rapport ; les figures 207 et 208 illustrent une telle application du soudage.

Une pièce doit être conçue de façon que sa configuration réduise au minimum les déchets de métal lors de la taille. Dans ce but, chaque moitié de la pièce doit être l'image la plus parfaite possible de l'autre; la figure 209 donne des exemples d'une pièce dont la configuration est conforme (*b*) ou non (*a*) à une taille rationnelle.

Pour faire une économie de métaux non ferreux, une pièce monobloc peut être remplacée par un ensemble dont certains éléments seulement sont en métaux non ferreux, montés à force sur la pièce principale ou fixés par d'autres modes d'assemblage.

Les dimensions minimales des trous exécutés par des poinçons et des matrices en acier sont en fonction de la forme (ronds, carrés, rectangulaires): pour l'acier doux, de 1,0 à 0,7; pour le laiton et le cuivre, de 0,9 à 0,6; pour l'aluminium et le zinc, de 0,8 à 0,5; pour le textolite, de 0,7 à 0,4; pour le carton et le papier, de 0,6 à 0,3 de l'épaisseur du matériau en œuvre.

Pour le découpage et le poinçonnage par des outils en acier, les rayons de conjugaison minimaux des parties diverses du contour sont choisis égaux à 0,90 de l'épaisseur du matériau en œuvre.

La distance minimale entre les trous et le bord des pièces ainsi qu'entre les trous voisins est pour l'acier doux de 0,7 à 1,5 de l'épaisseur. Dans les pièces courbes et étirées la distance (x) entre le bord du trou et la paroi est prise

$$x = R + 0,5\ s,$$

où R est le rayon de conjugaison de la paroi avec la surface dans laquelle le trou est percé;

s, l'épaisseur du matériau.

Pour un acier doux, la largeur minimale d'une pièce doit être de 1,5 fois supérieure à l'épaisseur du matériau.

Lors du cambrage sur des matrices, la hauteur de la partie droite des rabats doit être plus grande que la double épaisseur du matériau. Si la hauteur imposée est inférieure, il faut exécuter dans la paroi à cambrer une rainure par repoussage ou par usinage ultérieur.

Au droit où l'arrondi est conjugué à la paroi verticale, là où il y a une courbure, le matériau s'amincit et il se forme des empreintes qui ne peuvent être corrigées que par des opérations supplémentaires.

Les écarts de Δ pour les ailes des cornières et des étriers exécutés par cambrage peuvent varier en fonction de l'épaisseur du matériau s:

s, mm	jusqu'à 2	2 à 4	plus de 4
Δ, mm	± 0,15	± 0,3	± 0,4

Lorsque l'emboutissage est appliqué pour la fabrication des pièces comportant des surfaces planes de dimensions importantes,

pour parer à la formation de bombements locaux il faut munir ces surfaces de nervures de renforcement allongées et entrecroisées.

Pour obtenir une pièce de forme compliquée imposée par les spécifications de fonctionnement et difficile à emboutir, il faut la diviser en éléments simples assemblés par estampage ou soudage.

Dans la fabrication des pièces coulées, il est recommandé de se laisser guider par les considérations suivantes. La forme de la pièce doit permettre une extraction facile du modèle à partir du moule. Dans ce but les surfaces verticales doivent comporter des dépouilles dont la valeur est définie par la hauteur de la surface. Les dépouilles des surfaces intérieures sont plus grandes que celles des surfaces extérieures. Il faut éviter au possible l'utilisation de modèles à éléments amovibles, ainsi que de joints aux surfaces complexes.

Il faut tenir compte de la position des surfaces lors de la coulée et éviter au possible les grandes surfaces horizontales dans la partie supérieure du moulage, susceptibles de retenir les gaz qui se dégagent du métal ou qui se forment dans le moule et interviennent dans la production des soufflures.

La conception d'une pièce à couler doit assurer le remplissage parfait du moule, une direction et une vitesse d'écoulement régulières.

L'étude d'une telle pièce doit prévoir le retrait, le freinage mécanique produit par le moule et les noyaux, et le freinage thermique, résultant de la différence entre les vitesses de refroidissement des diverses parties de la pièce.

La conception d'une pièce doit assurer au possible un refroidissement uniforme de toutes les sections et un retrait libre pour prévenir la production des contraintes internes, source de gauchissements et de criques éventuels.

La configuration de la pièce doit permettre le tronçonnage sans obstacles des masselottes, des attaques et des évents, l'extraction des noyaux et des armatures.

Sur les dessins des pièces à couler les surfaces d'appui utilisées en usinage doivent être repérées; elles marqueront également le point de départ lors de la vérification des modèles et des pièces coulées. Les surfaces d'appui doivent être engendrées au possible par le modèle et toutes réunies dans un châssis pour éliminer les perturbations éventuelles résultant du déplacement des châssis et des noyaux. Il est recommandé de ne définir qu'une seule surface d'appui pour chacun des trois axes des coordonnées tridimensionnelles.

L'épaisseur des parois sera choisie en fonction des dimensions et du poids de la pièce, du métal en œuvre et du procédé de fonderie.

Il ne faut pas perdre de vue que les raccordements progressifs entre les sections et l'absence d'angles aigus déterminent l'obtention

d'une pièce exempte de défauts de fonderie. Il est recommandé de prévoir dans une même pièce des congés de même rayon ou de limiter au maximum le nombre des rayons différents.

Les variations brusques des sections sont à prohiber, leur raccordement doit être progressif (fig. 210 à 212). Les rayons des congés

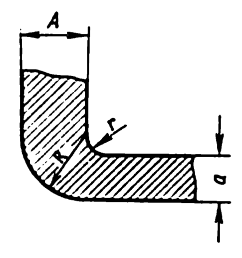


Fig. 210. Raccordement angulaire des parois dont le rapport entre les épaisseurs A et $a < 2$

Fig. 211. Raccordement angulaire des parois dont les rapports entre les épaisseurs A et $a > 2$

(R et r) et les lignes des raccordements (cotes h et C) d'une même paroi ou des raccordements angulaires entre deux ou trois parois sont définis par l'épaisseur des parois conjuguées (A et a).

La construction des nervures est déterminée par l'encombrement des pièces; leurs cotes sont fonction de celles des parois.

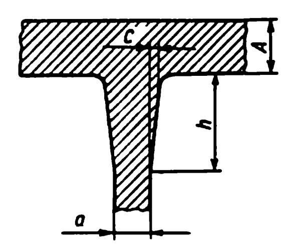


Fig. 212. Raccordement de trois parois

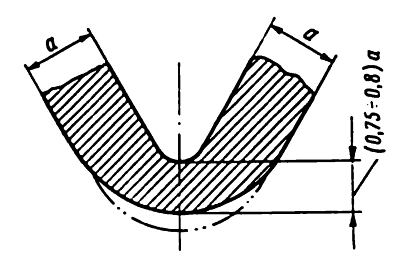


Fig. 213. Conception de l'angle d'une pièce coulée

Les rayons des raccordements des surfaces conjuguées varient de 2 à 120 mm suivant leurs dimensions et les angles qui les raccordent.

Lors de l'étude des pièces coulées comportant des angles, il faut tenir compte d'une solidification plus rapide des angles saillants que des angles rentrants. Les courants thermiques perpendiculaires aux parois se rencontrent auprès des angles rentrants et donnent lieu ainsi à un « point chaleur » qui ralentit le refroidissement. Au sommet de l'angle, l'épaisseur doit être de 20 à 25 % inférieure à celle des parois associées (fig. 213).

On conçoit la forme des enceintes de façon à éviter au possible l'emploi des noyaux. Les rapports dimensionnels des enceintes produites par les parties du moule sans recourir aux noyaux sont définis par la position relative de ces enceintes dans le moule. Lors du moulage mécanique, les enceintes formées par les parties du moule situées dans le châssis inférieur (fig. 214) admettent $H \leqslant D$; pour les enceintes formées par les parties du moule placées dans le châssis supérieur $h \leqslant 0{,}3\ d$; pour le moulage à la main, on pose $H \leqslant 0{,}5\ D$ et $h \leqslant 0{,}15\ d$.

Si le nombre des enceintes formées par les noyaux est grand, il faut s'efforcer de les unifier. Dans le cas d'un noyau de longueur

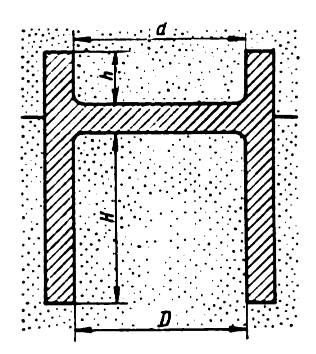


Fig. 214. Illustration du calcul des cotes des enceintes intérieures des pièces coulées

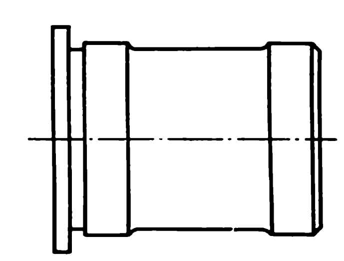


Fig. 215. Construction d'une pièce assurant la rigidité d'usinage imposée

supérieure au double de son diamètre, la forme de l'enceinte doit prévoir la fixation du noyau dans ses deux parois. Les dimensions des enceintes et les diamètres des trous engendrés par les noyaux doivent permettre de consolider les noyaux par l'utilisation des carcasses coulées ou en fil de fer.

La construction d'une pièce de fonderie doit rendre possible l'évacuation du sable et des carcasses à partir des enceintes intérieures, ainsi que le nettoyage minutieux des enceintes. Il faut prévoir à cet effet des trous spéciaux dans les enceintes, qu'il faut obstruer ensuite avec des bouchons.

Au droit des trous les parois sont renforcées par des bossages.

La hauteur minimale des bossages recommandée pour les pièces dont les dimensions sont inférieures à 0,5 m est de 5 mm, dont les dimensions varient de 0,5 à 2 m, de 10 à 15 mm et pour les pièces plus grosses que 2 m, de 20 à 25 mm.

Les prescriptions fonctionnelles imposées par l'usinage des pièces mécaniques consistent à réduire au possible le volume des

travaux en n'imposant des tolérances que sur les cotes des surfaces d'ajustement. La fabrication des ébauches par des procédés précis peut rendre inutile l'usinage des pièces.

Prévoir des surfaces d'appui commodes et sûres pour la mise en place des ébauches en cours d'usinage et par le choix d'une cotation correspondante faire coïncider au possible les surfaces d'appui et de référence.

Assurer à la pièce une rigidité suffisante pour résister aux efforts de coupe sans déformation visible (fig. 215).

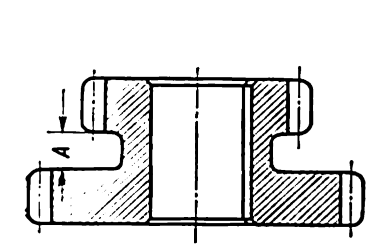


Fig. 216. Construction d'une pièce assurant le dégagement de l'outil

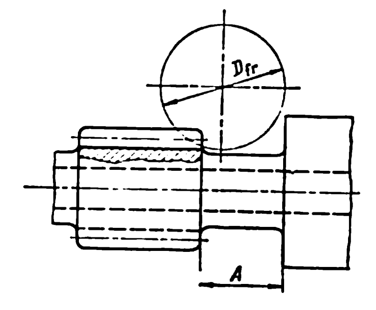


Fig. 217. Construction d'une pièce assurant le dégagement de la fraise

Prévoir un accès commode à la surface façonnée pour les outils rigides et à rendement élevé.

La différence imposée entre les cotes des surfaces brutes et façonnées doit assurer, compte tenu des surépaisseurs, un dégagement sans obstacles de l'outil, les défauts de la pièce brute ne dépassant pas les limites admissibles.

Prévoir un dégagement libre pour l'outil lorsqu'il travaille par passes débouchantes (fig. 216 et 217, cote A).

Etudier la construction des pièces de façon qu'on puisse en usiner plusieurs à la fois (fig. 218).

Les prescriptions de fabrication définies par les surfaces élémentaires des pièces mécaniques sont les suivantes.

Surfaces de révolution extérieures. Appliquer à grande échelle le façonnage par refoulement des têtes, des flasques, des bourrelets afin de réduire le volume d'usinage et le débit du métal.

Il est recommandé de laisser les centres sur les arbres usinés entre pointes.

Unifier au maximum les éléments des queues pour appliquer lors de leur usinage les mêmes réglages des porte-outils à outils multiples (fig. 219).

Partout où cela est possible, il est recommandé d'exécuter les surfaces sphériques extérieures avec un plat normal à l'axe (fig. 220).

Trous. Prévoir au possible des trous débouchants car leur exécution est beaucoup plus simple que celle des trous borgnes. Etudier

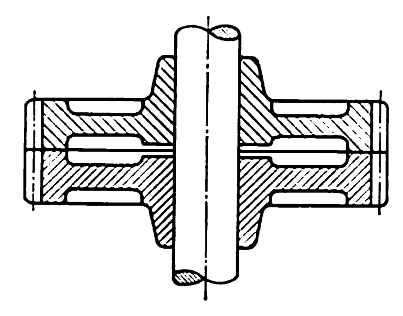


Fig. 218. Mise en place de deux ébauches d'un pignon pour un usinage simultané

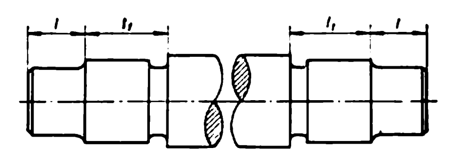


Fig. 219. Eléments unifiés des queues

la forme des trous borgnes en fonction des outils employés (alésoir, fig. 221, *a*, ou foret aléseur, fig. 221,*b*).

La distance entre les trous et la paroi d'une pièce ne doit pas être inférieure à une certaine valeur: $A \geqslant \frac{D}{2} + R$ (fig. 222), et pour

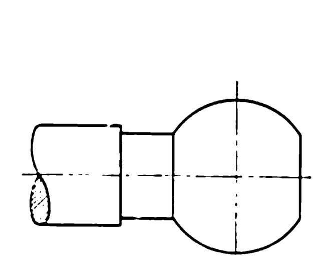


Fig. 220. Surface sphérique avec un plat

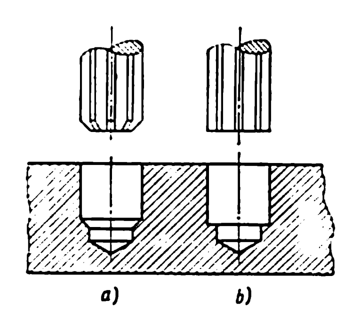


Fig. 221. Forme des trous borgnes mise en accord avec la géométrie des outils

les trous prévus pour les boulons d'assemblage, $A \geqslant \frac{D_é}{2} + R$, où $D_é$ est le diamètre du cercle circonscrit de l'écrou.

En désignant les distances entre les trous, il faut tenir compte de l'utilisation éventuelle des têtes de perçage multibroches. L'unification de la disposition et des cotes des trous dans les flasques rend possible l'utilisation des têtes multibroches. Le choix du nombre

de trous dans les flasques se fait de façon qu'on puisse les exécuter avec une tête à trois ou quatre broches avec pivotement ultérieur.

Pour prévenir le bris des forets lors du perçage, les surfaces d'entrée et de sortie doivent être perpendiculaires à l'axe du trou.

Lorsqu'on veut exécuter simultanément plusiuers trous ayant un axe commun, il est recommandé de diminuer successivement leur diamètre d'une valeur dépassant la surépaisseur d'usinage du trou précédent.

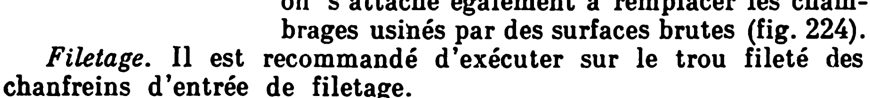
Fig. 222. Illustration de l'établissement de la distance entre l'axe d'un trou et la paroi

Lors du perçage des trous dans des rainures, le diamètre des trous doit être de 0,5 à 1 mm inférieur à la largeur des rainures.

Dans les trous étagés, le plus précis doit être le trou débouchant.

Une surface sphérique concave doit comporter un trou débouchant ou borgne pour éliminer la coupe éventuelle à des vitesses nulles (fig. 223).

Il est recommandé d'éviter l'exécution des rainures dans les trous façonnés sur des perceuses ou des machines d'opération à unités d'usinage, car on complique ainsi l'usinage; on s'attache également à remplacer les chambrages usinés par des surfaces brutes (fig. 224).



Filetage. Il est recommandé d'exécuter sur le trou fileté des chanfreins d'entrée de filetage.

Le filet perdu effectué au taraud dans un trou borgne sans dégagement doit compter trois filets pour la fonte et cinq filets pour l'acier.

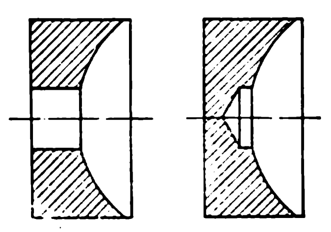


Fig. 223. Construction d'une surface sphérique concave

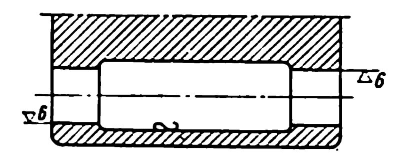


Fig. 224. Remplacement d'un chambrage par une surface brute de fonderie

Pour le fraisage des filets, le dégagement n'est pas de rigueur.

Les filets doivent être normalisés non seulement pour la machine considérée, mais pour tous les filets employés à l'usine, et même dans la branche industrielle considérée. Il convient d'éviter au possible l'emploi de petits filets (6 mm et moins) car leur exécution mécanique provoque le bris fréquent des tarauds.

Les filetages des extrémités des arbres doivent comporter un filet perdu.

Surfaces planes. La configuration des surfaces planes doit permettre au possible l'enlèvement de copeaux régulier et sans à-coups.

Les cotes des plans usinés doivent être en accord avec les dimensions des fraises normalisées, c'est-à-dire que les largeurs des plans usinés doivent être unifiées conformément à la série normale des diamètres des fraises en bout ou des longueurs des fraises à surfacer.

Dans le cas où le dégagement de l'outil n'est pas prévu, la partie raccordant les plans doit correspondre aux spécifications dimensionnelles et géométriques de l'outil (fig. 225 et 226).

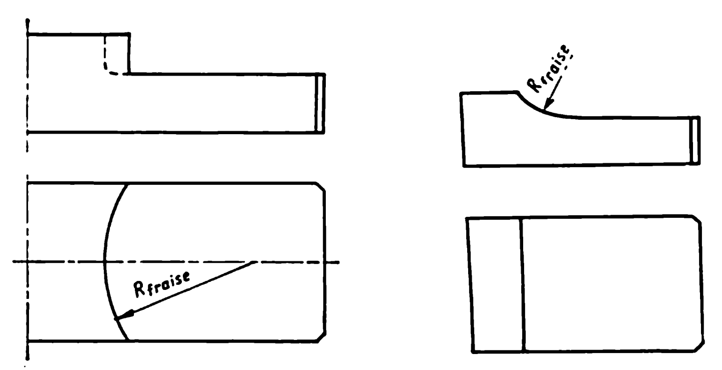


Fig. 225. Conception de la partie raccordant un plan façonné par une fraise en bout

Fig. 226. Conception de la partie raccordant un plan façonné par une fraise à surfacer

Surfaces de forme. Les rayons des surfaces concaves et convexes doivent être en accord avec les cotes des fraises normalisées demi-sphériques concaves et convexes.

Rainures et logements. Les rainures doivent permettre au possible leur exécution en débouchant. Si c'est impossible, la partie de raccordement d'une rainure doit correspondre au rayon de la fraise (fig. 227). La profondeur et la largeur des rainures doivent être choisies suivant les dimensions des fraises à rainurer normalisées.

Les rayons des congés à la base des logements doivent être les mêmes sur tout le pourtour (fig. 228) et correspondre aux spécifications dimensionnelles et géométriques des fraises à rainurer normalisées.

Certes, les prescriptions fonctionnelles imposées par la fabrication des pièces mécaniques, qui viennent d'être exposées, ne peuvent pas épuiser le problème dans toute son ampleur. Toutefois, elles démontrent d'une manière suffisamment argumentée la nécessité de mettre en accord la conception des pièces mécaniques avec la gamme de leur fabrication. L'établissement de ces prescriptions générales

imposées par la fabrication à la construction de la machine et de ses éléments nous autorise à entreprendre un essai d'analyse complexe des constructions du point de vue technologique. Nous pensons qu'une telle analyse peut être réalisée en partant des considérations exposées dans ce qui précède. Il se peut que l'analyse complexe la plus avantageuse se fasse à partir du stade final en remontant vers le point de départ de la fabrication, c'est-à-dire des prescriptions déterminées par la gamme d'assemblage général vers celles imposées

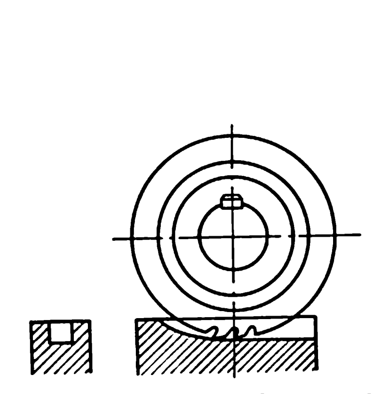




Fig. 227. Conception du raccordement d'une rainure

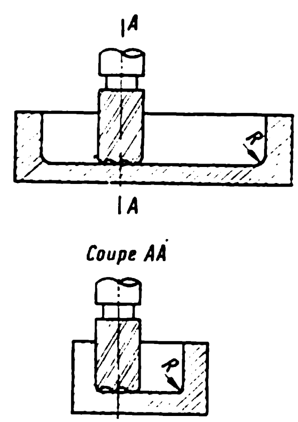


Fig. 228. Réalisation d'un logement

par les modes d'exécution des ébauches. Toutefois, il semble prématuré de tirer des conclusions avant que ne soit faite l'étude détaillée d'une telle analyse.

Il ne faut pas oublier que l'étude des pièces mécaniques en général, et surtout des pièces mécaniques complexes dont la construction est complètement définie par la fabrication, peut poser des problèmes technologiques qui ne peuvent être résolus que par les efforts conjugués des spécialistes dans les divers domaines de la production (formage sous pression, fonderie, usinage, etc.). Par conséquent, en étudiant les pièces mécaniques, il faut faire appel aux connaissances des spécialistes réunis au sein du Bureau de Méthodes. L'expérience de nos usines pilotes dans le domaine d'établissement de nouvelles constructions, avec la participation des agents d'étude et de méthodes, témoigne par ses acquis en faveur d'une telle collaboration. Dans le cas où de nouvelles constructions sont mises en fabrication, une telle collaboration accélère la mise au point des gammes et réduit au minimum les corrections et les modifications apportées dans les constructions et conditionnées par les prescriptions de fabrication.

CHAPITRE VI

Établissement des gammes de fabrication en construction mécanique

§ 1. Rédaction des gammes d'assemblage

Données de départ nécessaires pour l'établissement des gammes d'assemblage.
Vérification technologique des dessins de montage. Rédaction des feuilles d'instruction d'assemblage. Formes d'organisation du montage. Calculs de la durée, des cadences réelles d'assemblage, de la productivité du poste d'assemblage et du coefficient de sa charge. Choix des modes et des formes d'organisation du montage.
Succession des reprises d'assemblage. Ordonnancement de la gamme d'assemblage. Critères d'appréciation des gammes d'assemblage. Dossier d'assemblage.

Les éléments de départ pour l'établissement d'une gamme d'assemblage sont : a) le dessin d'ensemble qui définit la construction du produit ou de l'ensemble ; b) le cahier des charges imposant les conditions de réception ; c) le volume du programme.

Le niveau de l'étude détaillée d'une gamme d'assemblage est défini par le type de production et le volume de la tâche établie par le programme. Si la série est importante, la gamme d'assemblage s'établit d'une façon très détaillée, susceptible d'assurer une différenciation maximale. Dans le cas d'un programme peu important, on se borne souvent à donner un plan général des opérations d'assemblage.

L'établissement d'une gamme d'assemblage doit débuter par l'étude de la construction du produit à assembler, des conditions de son fonctionnement, et donc du cahier des charges.

L'étude de la construction s'accompagne nécessairement de la vérification du dessin d'ensemble du point de vue de la fabrication.

Le dessin d'ensemble fournit toutes les spécifications nécessaires pour l'exécution de l'assemblage, et, notamment, les projections et les coupes qui rendent possible une lecture rapide et complète de la construction du produit ; les repères des pièces et des ensembles constituant le produit, ainsi qu'une spécification de ces pièces et de ces ensembles ; les cotes à respecter lors de l'assemblage et, notamment, celles des jeux ; généralement, les dessins n'indiquent pas les autres cotes pour ne pas rendre difficile leur lecture ; le poids du produit ; le cahier des charges du produit ou des ensembles à assembler.

Si tels ou tels renseignements manquent, il faut les donner, et dans le cas de confusion ou d'erreur, le Bureau d'études apporte des corrections.

Des propositions concernant les modifications à apporter à la construction et susceptibles de simplifier l'assemblage sont acceptables à condition qu'elles ne perturbent pas l'ensemble du produit et son fonctionnement.

Il ne faut pas se borner à l'examen du dessin d'ensemble, il faut étudier également les dessins d'exécution des pièces constitutives du produit pour définir les travaux imposés par le montage.

L'étude du produit ou de l'ensemble à assembler se termine par l'établissement des feuilles d'instruction d'assemblage général et de montage des ensembles. L'établissement d'une feuille d'instruction devient beaucoup plus simple s'il existe un prototype du produit ou de l'ensemble. La succession des opérations de montage peut être établie alors au cours du démontage du prototype. Dans ces conditions, les éléments déposés sans démontage constituent des ensembles technologiques pour lesquels l'établissement d'une feuille d'instruction de montage des ensembles est impératif ; les pièces déposées isolément, sans faire partie d'un ensemble, constituent des éléments qui intéressent l'assemblage général de l'ensemble ou du produit.

Le démontage du prototype s'accompagne de l'établissement d'une feuille d'instruction du démontage à partir du produit ou de l'ensemble vers les éléments de base. On définit en même temps l'ordre des opérations de démontage. Le montage effectué dans l'ordre inverse du démontage permet de vérifier les instructions et d'y apporter les corrections nécessaires. En procédant de la même façon pour tous les ensembles on obtient enfin des feuilles d'instruction d'assemblage général et de montage des ensembles. Dans le cas d'absence d'un prototype, l'établissement des feuilles d'instruction d'assemblage et leur ordonnancement deviennent une tâche beaucoup plus compliquée.

Les feuilles d'instruction d'assemblage définissent les rapports relatifs entre les éléments du produit ou de l'ensemble, elles constituent donc les documents de départ pour l'établissement des gammes d'assemblage. L'existence des feuilles d'instruction simplifie nettement l'étude des gammes d'assemblage d'un produit complexe.

Il devient ainsi possible d'établir les gammes d'assemblage pour des groupes et des sous-groupes isolés, constitués généralement d'un petit nombre d'assemblages, pour passer ensuite à l'établissement des gammes d'assemblage général. La feuille d'instruction d'assemblage rend également possible l'étude de la gamme d'assemblage par plusieurs agents de méthodes simultanément ; en remplaçant l'étude successive par l'étude simultanée, on réduit nettement le

temps nécessaire pour établir une gamme d'assemblage. Par ailleurs, les feuilles d'instruction d'assemblage permettent de se faire une idée sur l'organisation avantageuse du travail en déterminant l'ordre de l'assemblage général et du montage des ensembles du produit et de ses groupes.

En abordant l'examen des formes d'organisation il faut noter qu'on distingue l'assemblage continu et discontinu.

L'assemblage discontinu n'est effectué que lorsqu'un ensemble ou un produit restent fixes. Un tel assemblage peut se faire soit directement à partir de pièces, soit à partir d'ensembles préalablement montés.

L'assemblage général s'opère généralement à partir d'ensembles préalablement montés, car un tel procédé réduit nettement sa durée par rapport au montage effectué directement à partir de pièces; c'est pourquoi l'assemblage général effectué à partir de pièces ne s'emploie que dans le cas où la conception du produit ne rend pas possible la constitution des ensembles.

En plus des avantages qui viennent d'être exposés, l'application du montage des ensembles diminue la quantité de travail grâce à la spécialisation des ouvriers.

L'assemblage continu prévoit le déplacement de l'objet à assembler, mais il peut s'effectuer également sur des bancs fixes. L'assemblage continu impose non seulement le dégagement du montage des ensembles en une opération à part, mais encore l'ordonnancement de l'assemblage suivant les opérations isolées dont chacune est confiée à un opérateur ou à une petite équipe d'ouvriers.

La valeur principale pour le calcul de l'assemblage continu est la cadence du montage qui définit, ainsi qu'on l'a déjà souligné, le temps nécessaire pour fabriquer une unité de produits ou d'ensembles assemblés.

La cadence réelle t_r d'un assemblage continu est calculée compte tenu du temps perdu relatif au matériel et du temps perdu relatif au personnel:

$$t_r = \frac{T_{jt} - T_{mat} - T_{per}}{N_p} \text{ mn/pièce,} \tag{142}$$

où T_{jt} est la durée de la journée de travail en mn;
T_{mat}, le temps perdu relatif au matériel en mn;
T_{per}, le temps perdu relatif au personnel;
N_p, le nombre de pièces à fabriquer par poste.

La cadence de l'assemblage continu doit comprendre la somme du temps opératoire total (temps principal et temps secondaire) et du temps nécessaire au déplacement de l'objet assemblé ou des opérateurs d'un poste de travail à l'autre.

A cet effet, un écart notable entre les temps d'exécution et les cadences du montage est corrigé par la répartition des reprises, susceptibles d'être isolées entre plusieurs phases connexes; cette correction s'effectue au cours de l'établissement de la gamme de fabrication.

L'assemblage continu avec déplacement de l'objet assemblé peut s'opérer de la façon suivante:

1) l'objet assemblé est transféré d'un poste à un autre manuellement (sur le banc, à l'aide de rouleaux, d'un chariot déplacé à la main sur une voie à rails ou sans rails);

2) l'objet assemblé est transféré d'un poste à un autre à l'aide de moyens de transport mécaniques; dans ce cas, ces appareils s'emploient exclusivement pour le déplacement interopérationnel des produits assemblés près des postes;

3) par chaîne animée d'un mouvement périodique (chaîne à palettes, chariots se déplaçant sur rails en chaîne sans fin); le montage s'effectue pendant les stationnements de la chaîne; chaque fois que la chaîne s'arrête, son dernier poste livre un produit (ou ensemble) fini;

4) par chaîne continue qui déplace le produit (ou l'ensemble) assemblé à une vitesse définie permettant d'effectuer les opérations de montage affectées à chaque poste de travail.

L'assemblage continu d'un objet fixe se fait sur des bancs fixes alignés. Chaque opérateur (ou chaque équipe d'ouvriers) exécute une opération en passant successivement d'un banc à un autre.

L'assemblage continu d'un objet fixe est plus avantageux que l'assemblage continu avec déplacement de l'objet dans les conditions d'une fabrication sérielle, lorsque le temps opératoire est important, et notamment lors de l'assemblage des machines lourdes difficiles à déplacer.

Le temps que mettent les ouvriers pour passer d'un poste à un autre ou pour réaliser le transfert de l'objet vaut:

$$\tau = \frac{l}{v}. \qquad (143)$$

où l est la longueur du poste de travail en m;

v, la vitesse de déplacement de l'objet en m/mn.

La vitesse de déplacement est a) de 10 à 15 m/mn pour les opérateurs passant d'un poste à un autre et transférant à la main l'objet assemblé; b) jusqu'à 20 m/mn pour le transfert sur rouleaux; c) de 30 à 40 m/mn pour le cas d'un matériel de transport mécanique; d) de 15 à 20 m/mn pour une chaîne à action périodique; pour une chaîne longue et lourde, la vitesse de déplacement est de 3 à 5 m/mn.

La vitesse d'une chaîne continue est donnée par la formule:

$$v=\frac{l}{t_r}\ \text{m/mn}, \qquad (144)$$

où l est la longueur du poste de travail en m;
t_r, la cadence réelle de l'assemblage en mn/pièces.

Pratiquement l'assemblage sur des chaînes continues s'opère à la vitesse de 0,25 à 3,5 m/mn.

La durée de l'assemblage continu (T_c) est calculée suivant la formule

$$T_c=n_c t_r\ \text{mn}, \qquad (145)$$

où n_c est le nombre de postes de travail (stations) tout le long de la chaîne d'assemblage;
t_r, la cadence réelle de l'assemblage en mn/pièces.

Le nombre de postes de travail est défini par celui des opérations de montage et de vérification, y compris les postes de réserve prévus.

Le nombre d'opérateurs à chaque poste d'assemblage est établi en fonction de la quantité de travail nécessitée par l'exécution des reprises composant la phase à exécuter, leur aptitude à l'exécution simultanée, ainsi que de l'encombrement des produits ou des ensembles assemblés.

La productivité du poste d'assemblage est donnée par la formule

$$Q=\frac{TB}{t_p} \qquad (146)$$

où Q est la productivité par unité de temps (par heure, journée de travail) exprimée en unités de produits ou d'ensembles assemblés;
T, le temps de travail auquel se rapporte la productivité (par heure, par journée de travail) en mn;
B, le nombre d'opérateurs affectés au poste d'assemblage;
t_p, le temps par pièce d'une opération d'assemblage en mn.

Le coefficient de charge d'un poste d'assemblage continu s'écrit

$$K_c=\frac{t_p}{t_r B} \qquad (147)$$

Le coefficient de charge d'une ligne d'assemblage continue

$$K_l=\frac{1}{n_c}\sum_{i=1}^{n_c} K_c. \qquad (148)$$

Les avantages de l'assemblage continu sont conditionnés par a possibilité d'effectuer les travaux sur un large front, de dimi-

nuer le stock interopérationnel, de spécialiser les postes et les opérateurs dont la qualification peut être plus faible. La réalisation d'un assemblage continu permet de réduire le volume de la fabrication inachevée et la quantité de travail nécessaire pour l'exécution des opérations d'assemblage par suite de la différenciation des opérations d'assemblage et une meilleure spécialisation des opérateurs. Mais d'autre part, l'utilisation de ce mode d'assemblage nécessite l'observation de certaines prescriptions qui ne se bornent pas à l'établissement d'une chaîne, mais affectent toutes les étapes précédentes de la production.

Pour assurer un assemblage continu, la construction du produit doit être minutieusement étudiée et mise en accord avec les prescriptions imposées à la fabrication par un travail continu. Les pièces interchangeables et les ensembles doivent être mis « à disposition » de la chaîne sans à-coups dans l'ordre exigé par la cadence de production. Les travaux d'ajustage ne sont admissibles sur la chaîne d'assemblage continue que dans le cas où le temps nécessaire pour leur exécution est absolument réglementé et mis en accord avec la cadence du montage ; lorsque les éléments sont ajustés chacun pris à part, il faut qu'ils soient livrés au montage déjà accouplés.

L'usinage des pièces doit tenir compte des prescriptions imposées par la fabrication continue (interchangeabilité, écarts de positions relatives des éléments des pièces ne dépassant pas les valeurs imposées, etc). Ainsi, l'assemblage continu est un facteur progressif qui contribue à l'amélioration de la technologie à tous les stades de la fabrication et accroît la productivité.

Une large application de la mécanisation à l'assemblage continu se transforme en automatisation des gammes d'assemblage ; c'est un moyen efficace pour accroître la productivité du travail.

Le choix des procédés et des formes d'organisation d'un assemblage est déterminé surtout par le volume du programme imposé, c'est-à-dire par le nombre de machines à produire.

Nous avons examiné plus haut [1] les procédés d'assemblage et en avons tiré la conclusion que l'assemblage d'un produit quelconque peut se faire par n'importe quel procédé de montage (interchangeabilité complète, interchangeabilité par groupes, réglage, ajustage), mais dans chaque cas il faut faire le choix du procédé le plus avantageux pour les conditions considérées. Pour la fabrication en moyenne et grande série, le mode le plus avantageux est celui de l'interchangeabilité. Lorsque la nécessité se présente, l'ajustage n'est pas exclu, mais il doit s'effectuer de façon à ne pas perturber la continuité du montage.

---

[1] Voir chapitre III, § 2.

Il en est de même pour les diverses formes d'organisation de l'assemblage. Le choix doit se faire d'abord entre l'assemblage continu ou discontinu. L'assemblage discontinu n'est employé que dans la fabrication unitaire.

Dans la fabrication sérielle et celle de masse, l'assemblage continu est la forme la plus avantageuse.

L'assemblage continu avec transfert à la main de l'objet assemblé d'un poste à un autre convient très bien pour la fabrication en petite série, car les frais d'installation des bancs, des rouleaux et des voies à rails avec des chariots ne sont pas importants ; de plus, cet équipement peut être utilisé pour le montage de produits variés.

L'assemblage continu avec transfert de l'objet à l'aide du matériel de transport mécanique est applicable dans les conditions d'une fabrication sérielle, aux lignes d'assemblage par groupes et aux lignes continues variables, ainsi que, dans les conditions d'une fabrication de masse, pour le montage des produits de faibles encombrement et poids.

L'assemblage à la chaîne qui auparavant n'était utilisé que dans la fabrication de masse est de nos jours de plus en plus appliqué dans la fabrication sérielle, lors de l'établissement des lignes d'assemblage des groupes et des lignes continues variables. Le choix entre les chaînes périodiques et continues est conditionné dans certains cas par les avantages du montage sur une chaîne en mouvement et par la cadence d'assemblage. Il faut tenir compte du fait que le déplacement d'une chaîne périodique implique une perte de temps parfois très importante. Cette perte de temps est calculée suivant la formule :

$$p = \frac{\tau}{t_r} 100 = \frac{l}{vt_r} \cdot 100 \%, \qquad (149)$$

où p est la perte de temps en % ;

τ, le temps du déplacement de la chaîne ;

l, la longueur du poste d'assemblage en m ;

v, la vitesse du déplacement de la chaîne en m/mn ;

t_r, la cadence réelle de l'assemblage en mn/pièces.

La proportion du temps perdu pour le déplacement de la chaîne est d'autant plus faible que la cadence établie par la chaîne est plus grande.

Pour une fraction donnée des pertes de temps par déplacement de la chaîne on peut calculer la valeur de la cadence d'assemblage à laquelle il est plus avantageux de recourir à une chaîne périodique :

$$t_r = \frac{l}{v} \cdot \frac{100}{p} . \qquad (150)$$

Ainsi, lorsque la longueur du poste d'assemblage $l = 4$ m, la vitesse de la chaîne $v = 5$ m/mn et la cadence réelle de l'assem-

blage $t_r = 3{,}2$ mn, il vient:

$$p = \frac{4}{5 \cdot 3{,}2} \cdot 100 = 25\,\%.$$

Pour que les pertes par déplacement de la chaîne ne dépassent pas 5 %, la cadence doit être:

$$t_r = \frac{4}{5 \cdot 5} \cdot 100 = 16 \text{ mn/pièces}.$$

Les modes et les formes d'organisation de l'assemblage adoptés définissent le choix de l'équipement et en premier lieu, du matériel de transport devant subvenir à l'exécution de l'assemblage continu. Il convient également de prévoir l'appareillage imposé par les prescriptions de fabrication et devant assurer la réalisation des travaux d'ajustement et de vérification, du rodage et des essais des ensembles et du produit assemblés.

La succession des phases d'assemblage s'établit en partant des considérations suivantes:

premièrement, les phases antérieures ne doivent pas accroître la difficulté d'exécution des phases à venir;

deuxièmement, lors de l'assemblage continu dans la fabrication de masse, l'ordonnancement de la gamme de fabrication est défini par la cadence du montage, le temps nécessaire à l'exécution de chaque phase devant être égal ou multiple de la cadence;

troisièmement, la vérification est impérative après les phases dont l'exécution peut conduire à la production du rebut, ainsi qu'après les phases d'assemblage effectuées par le procédé de réglage.

En partant de ces considérations et des feuilles d'instructions d'assemblage, on divise le montage d'un ensemble ou d'un produit en éléments technologiquement indivisibles et on calcule le temps opératoire total nécessaire pour la réalisation de chaque élément. Les éléments sont groupés par ordre successif en phases de façon que la somme des temps opératoires totaux des éléments soit à peu près égale à la cadence réelle du montage (compte tenu du déplacement de la chaîne périodique). Si le temps opératoire total est plus grand que la cadence, on s'efforce de le rendre multiple de cette cadence en faisant effectuer cette phase simultanément par deux ou plusieurs postes de travail. Dans le cas d'un assemblage continu avec le transfert manuel du produit ou de l'ensemble, la phase peut s'effectuer suivant le schéma de la figure 229. Les phases *1*, *2*, *4* et *5* sont choisies en fonction de la cadence du montage; le temps nécessaire pour l'exécution de la phase *3* est un multiple de la cadence; la phase est donc affectée à deux postes de travail (*3*, *a* et *3*, *b*); ainsi la cadence de la ligne d'assemblage n'est pas compromise, car les postes *3*, *a* et 3, *b* reçoivent à partir du poste *2* le produit après un intervalle égal à la cadence, et bien que la durée

de l'exécution de la phase à chacun de ces postes (*3, a* et *3, b*) soit le double de la cadence, ces deux postes délivrent au poste *4* le produit dans des intervalles de temps égaux à la cadence.

Dans le cas d'un montage à la chaîne, le simple dédoublement de la chaîne est impossible; le doublage des postes de travail s'effec-

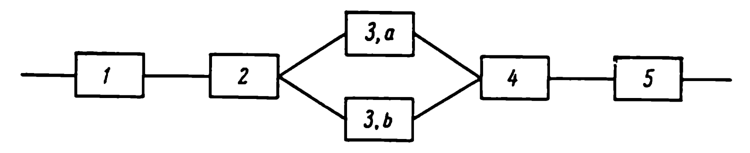


Fig. 229. Représentation schématique de l'exécution simultanée d'une phase d'assemblage continu, le produit ou l'ensemble assemblé étant transféré à la main

tue donc suivant le schéma de la figure 230. La longueur du poste de montage *3* est alors doublée par rapport aux autres postes $l_1 = 2l$; un tel poste est desservi par deux opérateurs. Lorsque le premier commence l'exécution de la phase en position *3, a*, le second l'a déjà exécutée à 50 % et se trouve au milieu du poste (position *3, b*);

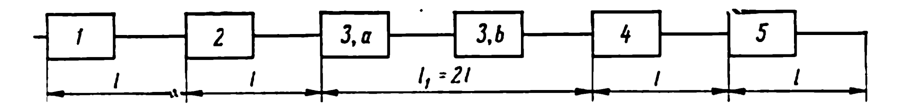


Fig. 230. Schéma d'exécution simultanée d'une phase de montage à la chaîne

lorsque le second opérateur s'approche du poste *4*, la chaîne étant en marche, le premier s'approche du milieu du poste *3* (position *3, b*); après avoir livré le produit assemblé au poste *4*, le second opérateur revient au point de départ (position 3, *a*); à ce moment-là le premier ouvrier se trouve au milieu du poste *3, b* et le cycle recommence.

Après avoir ordonnancé la gamme en phases suivant la cadence de l'assemblage réelle, on établit les temps d'exécution de chaque phase en indiquant la qualification nécessaire pour son exécution. Comme il est pratiquement impossible d'obtenir les mêmes temps d'exécution pour toutes les phases, des temps morts sont inévitables; ils sont révélés par le calcul des coefficients de charge pour chaque poste isolément et pour toute la ligne d'assemblage continu [formules (147) et (148)].

Une fois établie, la gamme d'usinage doit non seulement assurer un assemblage de qualité conforme aux prescriptions de fabrication qu'un produit doit satisfaire, mais encore être efficace et rentable dans les conditions de fabrication considérées.

Pour apprécier les différentes gammes d'assemblage ou les confronter avec celles des produits analogues, il faut se guider par des indices absolus: quantité de travail nécessaire pour l'exécution des phases et de tout l'assemblage (ou productivité, valeur inverse à la quantité de travail); prix de revient de l'exécution des phases de montage isolées et de toute la gamme d'assemblage [1].

Pour apprécier les gammes d'assemblage, on peut adopter comme indices relatifs:

a) le coefficient de charge de chaque poste et le coefficient de charge moyen de la ligne d'assemblage, calculés suivant les formules (147) et (148);

b) le coefficient de quantité de travail d'assemblage φ_a défini comme le quotient de la quantité de travail d'assemblage Q_a par la quantité de travail totale nécessitée par la fabrication de toutes les pièces faisant partie du produit ou de l'ensemble Q_p,

$$\varphi_a = \frac{Q_a}{Q_p} .$$

Ce coefficient définit la fabrication du produit ou de l'ensemble. Plus le coefficient φ_a est petit, mieux les gammes de fabrication des pièces et celles d'assemblage du produit sont étudiées et associées entre elles. Toutefois, il faut tenir compte de la circonstance suivante: si lors de la fabrication des pièces mécaniques on ne prend pas des mesures pour réduire la quantité de travail nécessitée par l'assemblage, l'augmentation de la productivité du travail, tout en réduisant la valeur de Q_p, accroît φ_a; il s'ensuit que la valeur de φ_a varie dans des limites très larges, de 0,1 à 0,4 et même plus. Il convient également de noter qu'avec le développement de la coopération industrielle en construction mécanique, le coefficient φ_a perd sa signification d'indice définissant l'ensemble de la production.

Dans les conditions d'une production coopérée, le coefficient de quantité de travail peut être remplacé par celui du prix de revient de l'assemblage φ_p défini par le quotient du prix de revient de l'assemblage P_a par celui du produit ou de l'ensemble (y compris le prix de revient de l'assemblage) P_p; alors

$$\varphi_{pr} = \frac{P_a}{P_p}$$

définit mieux l'importance spécifique du processus de montage dans la production globale du produit considéré, en faisant part non seulement des frais de main-d'œuvre directe, mais encore des frais de main-d'œuvre indirecte.

Les mesures technologiques essentielles qui contribuent à l'amélioration des indices techniques et économiques de l'assemblage sont:

---

[1] Voir le § 3 de ce chapitre.

substitution poussée au maximum des opérations manuelles par le travail mécanique, utilisation à une large échelle des montages d'assemblage et de vérification; élimination ou diminution au maximum des arrêts technologiquement inévitables par répartition des sous-phases entre les phases pour accorder au mieux le temps d'exécution total avec la cadence d'assemblage général.

Le dossier technologique d'assemblage contient les dessins d'assemblage, les feuilles des gammes de montage des ensembles et des gammes d'assemblage général, les feuilles d'exécution des phases et les feuilles d'instructions d'assemblage.

La feuille d'exécution de la phase indique l'ordre des phases à exécuter; elle contient également les renseignements nécessaires sur la marche de l'exécution de la gamme d'assemblage.

Les feuilles d'instructions d'assemblage sont rédigées pour des phases isolées particulièrement compliquées; elles contiennent des indications concrètes relatives à l'exécution de ces phases. La feuille d'instructions indique les temps alloués à chaque manipulation

§ 2. Etude des gammes de fabrication des pièces mécaniques

Principes qui régissent l'établissement des gammes de fabrication et le choix des modes d'exécution des pièces mécaniques.

Vérification technologique des dessins d'exécution. Considérations sur le choix du procédé d'obtention unitaire ou automatique des cotes imposées. Choix du mode d'exécution des ébauches, établissement préalable des surfaces d'appui et rédaction préalable de la gamme d'usinage.

Les phases à une et à plusieurs reprises. Usinage sur des machines à poste unique et à postes multiples. Réglage des machines à un outil et à outils multiples. Rédaction d'une phase d'usinage et établissement du réglage des machines pour usinage par outils multiples.

Contenu des tâches à exécuter par des machines-outils spéciales et établissement des projets de ces dernières. Lignes continues en fabrication sérielle pour l'exécution des groupes de pièces. Réglage des machines en fabrication sérielle pour l'exécution des groupes de pièces. Principes d'étude des réglages pour l'exécution des groupes de pièces sur des tours révolvers, des machines à plateau circulaire, des machines à outils multiples, des fraiseuses et des perceuses. Etablissement des gammes d'usinage pour l'exécution des groupes de pièces; dossier de fabrication et son rôle dans la fabrication.

Lors de l'établissement des gammes de fabrication, la tâche essentielle est d'assurer la fabrication des pièces mécaniques susceptibles de satisfaire à toutes les spécifications du cahier des charges. La réduction au possible de la quantité de travail, l'économie des matériaux et la diminution du prix de revient pour le volume considéré de fabrication des pièces mécaniques sont les éléments déterminant l'établissement d'une gamme d'usinage et le choix des modes de fabrication.

En d'autres termes, la gamme de fabrication prévue doit assurer pour un prix de revient minimal une qualité des produits susceptible de les rendre conformes à leur destination et aux conditions d'exploitation.

Si les gammes de fabrication s'établissent pour augmenter la production, cette augmentation ne doit pas s'obtenir par la simple multiplication du nombre des unités d'appareillage par le coefficient d'augmentation du programme.

Dans ces conditions, il faut élever le niveau technologique de la fabrication en appliquant des mesures technologiques et d'organisation correspondantes, et, dans certains cas, en trouvant des solutions technologiques nouvelles.

En construction mécanique, la rédaction d'une gamme de fabrication débute par l'étude et le contrôle minutieux des dessins d'exécution du point de vue de leur aptitude à la fabrication. L'agent de méthodes doit vérifier si le dessin contient tous les renseignements nécessaires pour la fabrication du produit.

Pour les pièces mécaniques, les dessins d'exécution doivent donner les projections, les coupes et les sections susceptibles d'informer d'une manière exhaustive sur les formes constructives de la pièce; les cotes tolérancées; les classes des états des surfaces usinées; les défauts de géométrie et de positions relatives des surfaces élémentaires admissibles; la matière d'œuvre et sa nuance; le poids de la pièce avec indication, au besoin, des écarts admissibles; les autres prescriptions techniques imposées à la pièce et à ses éléments (traitement thermique, dureté, revêtement, équilibrage, etc.).

Ensuite l'agent de méthodes procède à l'étude de la construction de la pièce compte tenu des prescriptions de fabrication exposées dans le chapitre précédent.

Si l'on entreprend de résoudre d'emblée tous les problèmes relatifs à l'analyse des dessins d'exécution, on risque de passer inaperçues certaines déficiences. C'est pourquoi l'étude et la vérification des dessins d'exécution doivent s'effectuer dans l'ordre successif en portant sur les questions suivantes:

1. La construction envisagée ne présente-t-elle pas de difficultés pour sa fabrication et ne peut-on pas la simplifier sans porter préjudice à l'aptitude de la pièce à sa fonction ? Vérifier en même temps la présence de toutes les projections, coupes et sections nécessaires pour exécuter la pièce.

2. N'est-il pas plus avantageux de remplacer la pièce considérée par une construction à carcasse ou par un ensemble soudé ou assemblé? Dans ces conditions, certes, la question du matériau d'œuvre doit être également révisée.

3. La pièce conçue n'interdit-elle pas l'application des modes de fabrication productifs et sa construction ne limite-t-elle pas le régime d'usinage?

4. Le dessin comporte-t-il toutes les cotes et les classes d'état de surface nécessaires pour l'exécution de la pièce, et les cotes imposées se prêtent-elles à la mesure directe?

5. L'exécution des tolérances sur les cotes et des classes d'état de surface imposées n'entraîne-t-elle pas des difficultés dans la fabrication? La gamme d'usinage assure-t-elle l'obtention de ces spécifications ou cette obtention nécessite des opérations supplémentaires?

6. Les limites des défauts de géométrie admissibles sont-elles suffisamment étudiées et sont-elles en accord avec les défauts géométriques des machines?

7. Les défauts de positions relatives admissibles ne provoquent-ils pas de difficultés de fabrication supplémentaires et peut-on les respecter sans compliquer la gamme d'usinage?

8. Quelles sont les phases supplémentaires qu'il faut introduire pour respecter les prescriptions du cahier des charges (écarts admissibles de poids de la pièce, par exemple)? N'est-il pas nécessaire de modifier certaines de ces prescriptions?

Il est évident que pour résoudre tous ces problèmes, il faut connaître la destination de la pièce, de même que les conditions de son fonctionnement au sein du produit assemblé. Aussi, outre l'étude et l'analyse du dessin d'exécution, il faut étudier l'ensemble dont la pièce fait partie, et le rôle qu'elle joue au sein du produit assemblé.

La vérification technologique des dessins d'exécution s'effectue sur la base des indications exposées au chapitre III, § 1, « Modes de fabrication des pièces mécaniques », et surtout suivant les renseignements fournis par le § 2 du chapitre V, « Prescriptions fonctionnelles imposées aux pièces mécaniques par leur fabrication ».

La matière d'œuvre de la pièce et le programme de fabrication définissent le mode d'exécution de l'ébauche choisi préalablement compte tenu du domaine d'application de chaque mode ; de la forme, des dimensions et du poids de la pièce, de la tenue des estampes, des coquilles ou des moules à pression, ainsi que d'autres indices caractéristiques. Le mode choisi doit être approuvé par le préparateur correspondant (forge, fonderie, soudage, etc.). Dans ces conditions, il est possible d'apporter dans les dessins des corrections susceptibles de tenir compte de l'exécution de l'ébauche.

Le type de l'ébauche choisie définit la structure de la gamme d'usinage ultérieur. Le mode d'exécution de l'ébauche définit notamment le procédé d'obtention des cotes automatique ou individuelle.

Lors de l'usinage, le procédé d'obtention unitaire des cotes est employé pour des ébauches fabriquées également par le procédé d'obtention individuelle des cotes (pièces exécutées par forgeage libre, grosses pièces moulées en sable suivant un modèle en bois) ; l'usi-

nage de telles ébauches par le procédé d'obtention automatique des cotes sur des machines réglées à l'avance avec une mise en place sur des montages spéciaux est rendu difficile par les tolérances très larges sur les cotes et les défauts de positions relatives importants. Les ébauches plus précises, fabriquées par l'obtention automatique des cotes (estampage à chaud, coulée dans des moules métalliques, etc.), sont exécutées également par le procédé d'obtention automatique des cotes.

Le procédé d'obtention des cotes choisi impose au dessin des prescriptions définies. Souvent la surface de référence choisie impose la modification de la cotation portée sur le dessin ou rend nécessaire l'introduction des cotes supplémentaires.

La précision de l'ébauche assurée par le mode d'exécution et les prescriptions imposées à la pièce définissent la gamme d'usinage et l'ordonnancement du dégrossissage, de la finition et de l'achèvement.

Les machines prévues pour l'ébauchage et le dégrossissage voient leur précision diminuer sous l'action des charges alternatives de la coupe et des variations importantes de la valeur des surépaisseurs; elles ne sont donc pas aptes à assurer l'observation des spécifications imposées à la finition. Aussi est-il avantageux de séparer parfois les opérations de dégrossissage et de finition, et de les exécuter sur des machines diverses ne serait-ce que d'une même dimension type. Toutefois un tel ordonnancement n'est pas toujours rationnel; il n'est pas justifié, notamment, pour l'usinage des pièces lourdes, lorsque chaque nouvelle mise en place demande un temps important, ainsi que dans le cas des surépaisseurs petites et uniformes, lorsque le dégrossissage ne se distingue que peu de la finition.

A titre d'exemple d'un ordonnancement avantageux d'ébauchage (dégrossissage) et de finition, on peut citer l'exécution précise des pièces insuffisamment rigides, lorsqu'il faut séparer les opérations de dégrossissage et de finition en appliquant entre ces opérations le vieillissement naturel ou artificiel supprimant les tensions internes et nécessaire pour stabiliser les dimensions.

Les opérations d'achèvement sont d'habitude exécutées isolément de la finition par suite de leur caractère spécifique. Pourtant en construction mécanique lourde, l'usinage fin s'effectue souvent sur les mêmes machines que la finition.

L'allure générale d'une gamme d'usinage est donc définie par les spécifications géométriques et dimensionnelles, le poids de la pièce, le mode d'exécution de l'ébauche et les prescriptions du cahier des charges. Dans ce domaine on peut se guider par les considérations suivantes. En premier lieu il convient d'établir les surfaces d'appui usinées tout au début du façonnage. Ensuite, il faut choisir la surface de départ susceptible d'assurer l'usinage des surfaces

d'appui. Lorsqu'il est possible, on choisit toujours comme surface de départ une des surfaces brutes commodes pour assurer la mise en place et qui ne subissent aucun usinage ultérieur. Si la pièce n'a pas de telles surfaces, on prévoit des bossages spéciaux utilisés comme surface de départ ; la surface de départ peut être choisie également parmi les surfaces brutes usinées par la suite, si leur position est définie sur le dessin d'exécution par une cote à partir d'une surface d'appui façonnée.

Ainsi, lors de l'exécution des pièces de support, on adopte généralement comme surface d'appui le plan de la base de la pièce pour le façonnage duquel on choisit comme surface de départ soit des trous principaux de la pièce, soit le plan opposé. Pour réduire les défauts de positions relatives entre les surfaces d'appui, leur usinage doit se faire à partir d'une seule mise en place (l'exécution des surfaces de base et de guidage respectivement perpendiculaires, par exemple) ; cette prescription peut être assurée également d'une autre manière.

Le choix des surfaces utilisées pour l'usinage se fait suivant les considérations exposées au § 2 du chapitre II, « Ablocage des pièces sur les machines ».

Compte tenu des déformations pouvant être produites par la redistribution des tensions internes, il est recommandé d'usiner en premier lieu les surfaces dont les spécifications de précision ne sont pas très rigoureuses pour passer ensuite aux surfaces plus précises. Pourtant, pour révéler à temps la présence d'un rebut (soufflures ou autres défauts du métal), on procède d'abord au dégrossissage, et même, au besoin, à la finition des surfaces pour lesquelles ces défauts sont inadmissibles ; lorsque dans ces conditions on découvre des défauts, l'ébauche est soit rebutée, soit, si c'est possible, corrigée à temps. L'achèvement se fait à la fin de la gamme d'usinage.

Pour réduire le routage des pièces au sein de l'atelier et pour éliminer leur déplacement dans le sens inverse, l'ordre des opérations doit tenir compte de l'implantation des machines dans l'atelier, si une telle appréciation, toutefois, n'influe pas d'une manière néfaste sur les résultats à obtenir.

Les gammes d'usinage des surfaces élémentaires sont définies par le calcul des surépaisseurs d'usinage ; ce calcul préside à l'établissement des reprises en tenant compte de la précision et de l'état de surface imposés.

Le calcul de la surépaisseur de la première reprise, compte tenu de tous les défauts de l'ébauche, et les spécifications imposées à la surface usinée déterminent si un seul usinage est suffisant ou s'il faut effectuer le dégrossissage et la finition. Lorsqu'il est avantageux d'enlever le copeau imposé en deux passes ou d'introduire une passe supplémentaire imposée par des tolérances serrées sur les dé-

fauts de forme et de positions relatives, on divise l'usinage en dégrossissage, semi-finition et finition.

L'achèvement et le choix des procédés se font en partant des spécifications auxquelles la surface usinée doit satisfaire.

Après le calcul des surépaisseurs intermédiaires et l'établissement des reprises, on calcule les cotes intermédiaires pour toutes les reprises depuis la pièce finie jusqu'à la pièce brute ; dans ce but les cotes de départ sont celles imposées par le dessin d'exécution, le calcul s'effectuant à partir de la dernière reprise en remontant jusqu'à l'ébauche (voir page 289).

Les tolérances sur les cotes intermédiaires sont désignées en fonction de la précision que les modes d'usinage choisis sont susceptibles d'assurer (voir Annexes 5a et 5b). Toutefois dans les cas douteux, la précision à obtenir doit être vérifiée par le calcul (voir chapitre II, § 3 ou 4). C'est là que prend fin le travail qui précède l'établissement des phases exécutées sur les machines-outils, phases pouvant prévoir une ou plusieurs reprises. D'autre part, la phase peut être conçue pour l'usinage imposant un seul poste prévu pour le serrage d'une seule pièce, ou plusieurs postes, assurant l'ablocage simultané de plusieurs pièces. Dans ce dernier cas, l'usinage se fait par lot opérationnel, terme sous lequel on comprend un certain nombre d'ébauches serrées simultanément sur la machine. Les ébauches peuvent être usinées simultanément, successivement ou d'une manière mixte. L'usinage peut s'effectuer avec mise à la cote d'un outil ou des outils multiples, l'ordre de travail dans les deux cas étant simultané, successif ou mixte.

Compte tenu de ce qui vient d'être dit, voici quelques définitions.

Une phase à une reprise est caractérisée par l'usinage d'une surface appartenant à une ou plusieurs ébauches avec un outil ou des outils multiples analogues.

Une phase à reprises multiples est caractérisée soit par l'usinage de plusieurs surfaces appartenant à une ou plusierus ébauches avec un ou plusieurs outils, soit par l'usinage d'une surface appartenant à une ou plusieurs ébauches par plusieurs outils variés.

Généralement, une gamme d'usinage contient des phases à une et à plusieurs reprises.

L'établissement des phases exécutées sur des machines-outils est difficile si la multiplicité des solutions technologiques éventuelles que ces phases peuvent fournir n'est pas classifiée. L'exécution d'une classification de cette documentation très vaste, sous forme de caractéristiques figurées sur les tableaux 6 et 7 des phases à une et à plusieurs reprises, simplifie dans une grande mesure la solution du problème complexe de l'établissement rationnel des phases exécutées sur des machines-outils, compte tenu des conditions définies de production.

Tableau 6

Caractéristique des phases à une reprise

Phases	Exemples
Poste d'usinage unique pour l'exécution d'une surface par un outil	
Poste d'usinage unique pour l'exécution simultanée d'une surface par des outils multiples analogues	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution simultanée d'une surface par un outil	
Postes d'usinages multiples pour l'exécution successive d'une surface par un outil	

Suite du tableau 6

Phases	Exemples
Postes d'usinage multiples pour l'exécution mixte d'une surface par un outil	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution simultanée d'une surface par des outils multiples analogues	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution successive d'une surface par des outils multiples analogues	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution mixte d'une surface par des outils multiples analogues	

Tableau 7

Caractéristique des phases à plusieurs reprises

Phases	Exemples
Poste d'usinage unique pour l'exécution de plusieurs surfaces par un outil simple ou rapporté	
Poste d'usinage unique pour l'exécution successive de plusieurs surfaces par un outil simple ou rapporté	
Poste d'usinage unique pour l'exécution mixte de plusieurs surfaces par une tête à outils rapportés	
Poste d'usinage unique pour l'exécution simultanée de plusieurs surfaces par des outils multiples	

Suite du tableau 7

Phases	Exemples
Poste d'usinage unique pour l'exécution successive de plusieurs surfaces par des outils multiples	VII, VI, V, IV, III, II
Poste d'usinage unique pour l'exécution mixte de plusieurs surfaces par des outils multiples	VII, VI, V, IV, III, II
Postes d'usinage multiples pour l'exécution simultanée de plusieurs surfaces par un outil (avec déplacement des ébauches)	

Suite du tableau 7

Phases	Exemples
Postes d'usinage multiples pour l'exécution successive de plusieurs surfaces par un outil (avec déplacement des ébauches)	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution mixte de plusieurs surfaces par un outil (avec déplacement des ébauches)	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution simultanée de plusieurs surfaces par des outils multiples	
Postes d'usinage multiples pour l'exécution successive d'une surface par des outils différents; *a* et *b*, réglages doublés	

Suite du tableau 7

Phases	Exemples
Postes d'usinage multiples pour l'exécution mixte de plusieurs surfaces par plusieurs outils	Ébauche Finition

Il est recommandé de choisir la variante de la phase à établir par la méthode d'exclusion. L'élimination des variantes se fait en partant de plusieurs indices.

La forme et les dimensions de l'ébauche définissent le volume du lot opérationnel éventuel, l'ordre du serrage des ébauches sur la table de la machine ou sur un montage (simultané, successif ou mixte), la complexité du réglage des machines et l'importance des marches à vide lors de l'usinage simultané de plusieurs pièces.

La réunion rationnelle des reprises est définie par la position relative des surfaces usinées et la position éventuelle des outils. Les particularités de la construction d'une ébauche, sa faible rigidité, par exemple, peuvent faire renoncer à l'exécution simultanée des reprises.

Une précision élevée ou un bel état de surface ne pouvant être obtenus que par un usinage fin ou par achèvement, ce mode d'usinage s'effectue en une phase particulière ou au moins en une reprise.

Le programme imposé définit les modes d'usinage, alors que l'ordre des reprises est déterminé par calcul des surépaisseurs compte tenu du type de l'ébauche. Dans le cas de l'établissement d'une gamme d'usinage pour une fabrication en marche il faut prendre en considération l'équipement disponible et sa charge.

Les variantes des phases adoptées dont la mise en œuvre est possible, sont confrontées du point de vue de leur productivité, comp-

te tenu, certes, du volume du programme. Pour élever la productivité, en choisissant les variantes des phases exécutées sur des machines-outils on prend celles qui permettent de réduire la longueur d'usinage. Cette longueur peut être diminuée, par exemple, en mettant en œuvre le tournage par outils multiples et le perçage bilatéral, en remplaçant, lors de l'exécution d'un filetage, une fraise disque à fileter ou un outil par une fraise à plusieurs filets, ainsi qu'en appliquant la méthode de l'avance radiale lors de l'usinage des corps de révolution. Pour accroître efficacement la productivité des phases exécutées sur des machines-outils on peut également diminuer la part du temps supplémentaire dans le temps d'usinage par pièce, en le recouvrant complètement par le temps machine et en diminuant sa durée. Ainsi, en employant des têtes à fileter avec des peignes expansibles et des têtes à tarauder les écrous avec des peignes noyés, on élimine le renversement de la marche tout en diminuant la marche à vide.

Pour confronter les variantes des phases suivant leur productivité, on peut se borner à comparer le temps d'usinage par pièce d'une phase exigeant une quantité maximale de travail avec la somme des temps d'usinage par pièce des phases qui lors de l'exécution d'une autre variante demandent la même quantité de travail.

Le choix de la phase définit le type de la machine et son réglage (mise à la cote d'un outil ou des outils multiples), ainsi que le type du montage sur lequel les ébauches sont serrées (montage simple ou multiple).

Une phase type pour un travail unitaire prévoit le serrage d'une pièce sur une machine-outil; cette phase est caractérisée par: 1) l'exécution de plusieurs reprises successives réalisées par un ou plusieurs outils remplacés successivement; 2) l'exécution de plusieurs reprises exécutées simultanément par plusieurs outils sur des tours ou des raboteuses à chariots multiples et sur des fraiseuses genre raboteuse multibroches, la phase comportant parfois plusieurs sous-phases.

Lors de l'obtention individuelle des cotes, le recours aux postes multiples pour l'exécution de plusieurs pièces sur une machine-outil rend plus compliqueé la mise en place des ébauches qui nécessite un dégauchissement. On n'y recourt donc que dans le cas où l'usinage simultané de plusieurs pièces permet de réduire le temps par pièce. c'est-à-dire lorsque le gain en temps machine couvre les frais élevés en temps secondaire. La disposition successive des ébauches ne peut être justifiée que dans le cas où leur forme n'impose pas lors de l'exécution des pièces des temps morts importants, ce qui est obtenu par la réduction des temps d'attaque et de dégagement de l'outil ; la disposition parallèle des ébauches est justifiée lorsqu'il est possible de les usiner simultanément avec plusieurs outils, sur

des raboteuses à deux chariots verticaux et à deux chariots latéraux, par exemple.

En construction mécanique lourde on recourt également à l'usinage simultané de plusieurs surfaces élémentaires d'une ébauche à l'aide d'unités d'usinage et de machines portatives fixées soit directement sur l'ébauche, soit sur le marbre où repose l'ébauche; dans ce cas, le temps machine est défini par la plus longue reprise dont la durée est supérieure au temps machine des autres reprises.

Ainsi, on établit les phases dont l'ensemble constitue une gamme d'usinage.

Le travail ultérieur consiste à préciser ensuite les phases, et à cet effet choisir pour chaque opération le type dimensionnel de machine conforme à l'encombrement de la pièce; établir les surfaces d'appui et le mode d'ablocage, parfois en réalisant des calculs qui déterminent les défauts éventuels; dresser au besoin un croquis de mise en place; désigner les reprises et les outils nécessaires à leur exécution ; définir les régimes de coupe compte tenu de la cadence imposée et désigner l'indice de qualification de l'opérateur en fonction des connaissances et de l'aptitude exigées par l'exécution de l'opération.

Le procédé d'obtention automatique des cotes est caractérisé par la mise à la cote des outils multiples.

L'établissement du réglage prévoyant la mise à la cote des outils multiples se fait par stades suivants:

1. Etablissement d'un plan de répartition des outils en fonction des reprises et calcul préalable des régimes de coupe conformes à la cadence imposée.

2. Etude de l'appareillage suivi d'un choix définitif de la disposition des outils et correction des régimes de coupe.

3. Composition de la fiche de réglage, y compris l'établissement de la disposition des outils repérés par des symboles qui leurs sont affectés, choix des reproducteurs, des pignons, etc., établissement définitif des régimes de coupe et calcul des temps d'usinage par pièce.

4. Composition des dessins d'exécution de l'appareillage.

L'établissement d'une phase exécutée sur une machine-outil et d'un réglage de la machine pour une mise à la cote des outils multiples prévoit le calcul des régimes de coupe, des cotes de réglage, des forces appliquées, de la rigidité du système technologique, de la précision d'usinage éventuelle, les surfaces d'appui et de référence étant imposées, de la grandeur des courses de travail et marches à vide, des vitesses, etc.

Lors du réglage de la machine pour une mise à la cote des outils multiples, le calcul et le choix des régimes de coupe doivent assurer un travail bien réglé de tous les outils en œuvre.

La profondeur de coupe est définie par la surépaisseur compte tenu des considérations déjà exposées sur l'usinage effectué en une phase ou par dégrossissage et finition.

Si l'ébauche est rigide, l'avance de chaque outil est définie indépendamment de l'action des autres outils; l'avance du chariot est choisie alors d'après la plus petite des valeurs admissibles pour tous les outils portés par le chariot considéré (tête, mandrin, etc.). Si la rigidité de l'ébauche est insuffisante, l'avance est choisie compte tenu de l'effort de coupe total de tous les outils en action, afin d'éviter les fléchissements de l'ébauche et le broutement. L'égalisation des temps nécessaires pour l'exécution des courses de travail des chariots se fait par correction des avances. A cet effet, on définit le temps de la course de travail du chariot à limitation la plus importante et on y réduit le temps de course des autres chariots.

Le temps d'une course de travail de chaque chariot s'écrit:

$$t_{ct} = \frac{L_{ct}}{a}, \tag{151}$$

où L_{ct} est la longueur de la course de travail du chariot; a, la valeur de l'avance par minute du chariot.

Pour le chariot à limitation la plus importante on tire

$$t_{lim} = \frac{L_{lim}}{a_{lim}}.$$

En égalisant le temps de la course de travail de chaque chariot à celui de la course de travail du chariot à limitation la plus importante, on obtient

$$\frac{L_{lim}}{a_{lim}} = \frac{L_{ct}}{a},$$

d'où l'on déduit l'avance par minute du chariot

$$a = a_{lim} \frac{L_{ct}}{L_{lim}}, \tag{152}$$

où a_{lim} est l'avance par minute du chariot à limitation la plus importante;

L_{ct}, la course de travail du chariot pour lequel on définit l'avance;

L_{lim}, la course de travail du chariot à limitation la plus importante.

La longueur de la course de travail est définie comme la somme des courses d'approche, d'attaque, de coupe et de dégagement de l'outil.

En calculant les vitesses de coupe, on définit d'abord les vitesses de coupe et les nombres de tours nécessaires pour chaque outil pris

séparément, sans tenir compte du réglage prévu pour la mise à la cote des outils multiples.

Pour les machines à une broche et multibroches dont les broches tournent toutes à la même vitesse (tours automatiques et semi-automatiques) la vitesse est choisie suivant l'outil à limitation la plus importante.

Pour les machines assurant la même avance par minute pour tous les outils (perceuses multibroches et têtes de perçage), la vitesse de coupe est définie par l'avance par minute de l'outil à limitation la plus importante.

Pour les machines aux vitesses et aux avances par minute indépendantes (tours verticaux multibroches semi-automatiques, machines spéciales à unités d'usinage), on choisit les vitesses de coupe et les nombres de tours par minute tels qu'ils assurent pour l'avance calculée le temps de course de travail de chaque chariot ou broche égal au temps de course de travail du chariot ou de la broche qui portent l'outil à limitation la plus importante.

En établissant des phases prévoyant le travail d'un opérateur à plusieurs postes, il faut observer les conditions suivantes :

a) lors de l'exécution simultanée des surfaces d'une ébauche, l'usinage doit être continu jusqu'à la fin de la course de travail du chariot ; le réglage pour la mise à la cote des outils multiples agissant successivement ou d'une manière mixte doit prévoir le changement mécanique des couplages de la machine ;

b) les temps d'exécution de toutes les phases qui constituent la charge d'un groupe de machines desservies par un opérateur doivent être égaux ou multiples du plus petit temps d'exécution ;

c) le temps de la course de travail d'un chariot doit être égal ou plus grand que la somme du temps nécessaire pour le démontage et le montage des ébauches (t_{dm}) et du temps nécessaire à l'opérateur pour passer d'une machine à l'autre t_{pass} ($t_{ct} \geqslant t_{dm} + t_{pass}$) ;

d) les machines doivent être munies d'un mécanisme de déblocage mécanique de l'avance en fin de course de travail du chariot.

Ces prescriptions sont imposées par les conditions de travail d'un opérateur assurant le fonctionnement de plusieurs machines-outils.

L'établissement des gammes de fabrication des machines et de leurs éléments effectué par un agent de méthodes est un travail de création et c'est pourquoi il est impossible d'énoncer les règles qui soient communes pour toutes les gammes éventuelles. L'activité des ingénieurs de méthodes aboutit parfois à trouver de nouvelles solutions technologiques et à créer un appareillage nouveau.

Les principes essentiels et les considérations exposés ci-dessus ont pour but de guider l'agent de méthodes dans l'établissement des gammes et l'analyse des travaux et de contribuer à la recherche de

la solution rationnelle de ce problème compliqué avec des frais de temps minimes.

Dans les conditions d'une fabrication en grande série et de masse, il est souvent plus avantageux de prévoir une machine spéciale pour l'exécution d'une phase. Il faut alors constituer un dossier définissant la tâche que doit remplir la machine à étudier. Ce dossier doit indiquer: 1) le type de la machine et les caractéristiques sommaires de son organisation; 2) son affectation, dénomination et repère de la pièce à exécuter et phases de la gamme d'usinage pour lesquelles elle est prévue; 3) la productivité en pièces par heure et par journée de travail; 4) la matière d'œuvre (nuance, charge de rupture, dureté); 5) le nombre total d'indexages y compris celui d'alimentation; 6) les régimes d'usinage approximatifs, c'est-à-dire profondeur de coupe, avances, vitesses de coupe, nombres de tours et longueurs des courses de travail en fonction des indexages pris chacun séparément avec indication des limites lors du réglage de la machine; 7) l'huile de coupe, le mode de son amenée, la pression de travail et le débit par unité de temps; 8) le montage de l'appareillage (spécial ou normalisé avec référence à la normale), l'ablocage de l'ébauche automatique ou manuel et les commandes d'ablocage automatique (pneumatique, hydraulique ou électrique); 9) le courant d'alimentation du moteur électrique; 10) la commande de la machine (par boutons ou leviers); 11) les conditions particulières de sécurité définies par le caractère spécifique de la pièce exécutée et des régimes d'usinage.

Le dossier doit contenir: 1) le dessin de l'ébauche telle qu'elle est fournie à la machine et celui de l'ébauche après l'exécution de la phase; les dessins doivent renseigner sur le poids de l'ébauche, donner ses dimensions tolérancées et les états de surface avant et après usinage; indiquer par des signes conventionnels les surfaces d'appui et les points de serrage de l'ébauche. Pour l'étude d'une machine à indexages multiples, les dessins doivent être donnés pour chaque indexage; 2) si l'exécution de la phase impose l'utilisation des outils spéciaux, les dessins et les croquis de ces outils; 3) la feuille de la gamme d'usinage de la pièce pour laquelle la machine est prévue; 4) la feuille d'instructions de la phase considérée, avec indication de toutes les sous-phases; 5) pour les pièces qui se trouvent en cours de fabrication, il est recommandé d'adjoindre les feuilles d'instructions de la gamme d'usinage en vigueur avec indication du temps d'usinage par pièce ou de la norme de travail, ainsi que du temps machine et du temps secondaire; 6) le cahier des charges pour l'exécution de la phase envisagée, dont les prescriptions imposées peuvent être figurées sur le croquis de réglage.

Lors de l'établissement d'un projet d'étude d'une machine-outil spéciale, il faut tenir compte des modifications éventuelles de

la construction de la pièce ou de la gamme de sa fabrication. C'est pourquoi il est plus logique de prévoir une machine à unités d'usinage qui, au besoin, simplifie le remplacement des unités et permet, comme nous l'avons déjà dit, le réglage éventuel des éléments de coupe.

Dans une fabrication en grande et moyenne séries, l'étude des gammes d'usinage productives a ses particularités. On sait que la production continue en masse et surtout une fabrication automatisée, présente de grands avantages techniques et économiques par rapport à la fabrication sérielle courante.

L'utilisation dans la fabrication continue d'un équipement à rendement élevé et d'un appareillage spécialement conçu, ainsi que l'établissement des gammes d'usinage nouvelles permettent d'accroître la productivité et de réduire le prix de revient; dans ces conditions, le cycle de fabrication diminue et les surfaces disponibles sont mieux utilisées.

Les programmes trop faibles d'une fabrication en série ne permettent pas de tirer tous les avantages d'un processus continu. Si le volume de la fabrication est faible, il est impossible d'assurer la charge de l'équipement en ne lui affectant que l'exécution d'une seule phase; on est donc contraint de lui confier l'exécution de plusieurs phases d'usinage d'une pièce ou de pièces diverses.

Lorsque, dans les conditions d'une fabrication en série, la gamme est bien établie et l'appareillage bien conçu, il devient avantageux de créer des lignes de fabrication continue de groupes de pièces.

Dans de telles lignes, l'équipement est implanté en fonction du principe technologique de routage des pièces similaires quant à leur forme et leurs dimensions; toutes ces pièces sont usinées périodiquement par lots, et à chaque moment donné la ligne fonctionne comme une chaîne continue. Le passage d'une ébauche à une autre se fait parfois sans nouvelle mise à la cote, alors que d'autres fois on procède à une mise à la cote partielle.

Les résultats de l'application des lignes de ce type et leur efficacité comparée à la production sérielle courante sont fonction des frais de temps nécessaire pour la mise à la cote de l'équipement et de la perfection du matériel technique de cette mise à la cote.

L'établissement des gammes d'usinage pour les lignes de fabrication continue des groupes de pièces doit être précédé par la classification de toutes les pièces considérées suivant les prescriptions de fabrication: 1) machines et accessoires affectés à l'exécution des phases principales et leurs dimensions; 2) mode de mise en place de l'ébauche et type de montage; 3) précision et qualité de surface imposées à la pièce en œuvre.

Dans la fabrication en grande série dont le volume de production est important, on peut recourir à des lignes prévues pour la

fabrication continue de groupes de deux ou trois pièces de dénominations diverses mais similaires quant à leur forme et leurs dimensions. De telles lignes peuvent fonctionner sans retouche de réglage.

Lorsque le volume de production imposé par le programme est plus faible, le nombre de pièces de différentes dénominations affectées à la ligne continue devient important et leur similitude technologique diminue inévitablement.

Mais si les conditions sont favorables, ces lignes peuvent travailler sans retouche de réglage. L'équipement est choisi et implanté suivant le routage des pièces les plus compliquées dont l'exécution demande le plus de travail au sein du groupe, alors que le façonnage d'autres pièces du groupe peut se faire en laissant passer certaines machines.

Les lignes de fabrication continue de groupes de pièces qui, pour passer à l'exécution d'une autre pièce, imposent une retouche de réglage de l'équipement et de l'appareillage s'appellent lignes de fabrication continue intermittente. Il est également possible parfois de mettre en œuvre ces lignes avec un seul réglage pour l'exécution de plusieurs pièces dont les gammes d'usinage sont similaires.

Les lignes de fabrication continue de groupes de pièces, y compris les lignes de fabrication continue intermittente, peuvent être automatiques.

A titre d'exemples on peut citer la ligne automatique pour l'exécution de dix cotes types de pignons et la ligne automatique d'exécution de huit cotes types des rotors de moteurs électriques.

Comparée au même programme de fabrication par journée de travail suivant une gamme antérieure, la ligne a permis de réduire la quantité de travail nécessaire pour l'usinage d'un arbre de 0,41 à 0,11 heure. Au lieu de 19 machines desservies par 19 ouvriers, la ligne automatique de 9 machines est desservie par 3 opérateurs ; la production moyenne des arbres par unité d'équipement s'est accrue de 18 à 38 pièces, alors que la productivité moyenne par ouvrier travaillant directement dans la production, de 18 à 114 pièces par journée de travail.

Pour appliquer le principe des lignes de fabrication continue intermittente, il faut que l'économie en temps d'usinage des pièces qui lui sont affectées soit plus grande que les frais du temps supplémentaire nécessaire pour la retouche du réglage.

Le temps nécessaire pour les retouches du réglage de la ligne pendant un mois, par exemple, est défini, d'une part, par les conditions fonctionnelles et technologiques de l'exécution de ce réglage, et de l'autre, par le nombre de réglages réalisés pendant ce laps de temps, déterminé par l'importance des lots à fabriquer et par la périodicité imposée.

Quelle que soit la pièce ou le groupe de pièces à exécuter, le même ordre d'action des machines d'une ligne de fabrication continue intermittente est impératif, bien qu'il soit possible de réaliser l'usinage, comme nous l'avons déjà dit, sans utiliser certaines machines.

Si certaines opérations d'exécution d'un groupe de pièces peuvent se faire sur les mêmes machines réglées d'une manière analogue alors que d'autres réclament des machines différentes et ne peuvent être réalisées suivant une gamme d'usinage générale, il est avantageux d'exécuter les opérations communes en appliquant un même réglage pour un groupe de pièces. Dans ce cas, les groupes doivent être constitués de pièces pour lesquelles l'opération exécutée sur une machine réglée de cette manière soit la plus importante quant à la quantité de travail requise.

Si les pièces d'un groupe sont fabriquées en faible série, mais ne peuvent pas être exécutées sur une ligne de fabrication continue de groupes de pièces, tout en autorisant l'établissement d'une gamme d'usinage analogue en ce qui concerne les phases principales et imposant l'utilisation du même équipement et de mêmes accessoires, il est avantageux de les réaliser suivant une gamme d'usinage type. L'utilisation des montages normalisés et des mises à la cote des outils permet d'améliorer l'équipement de la gamme tout en réduisant la quantité de travail et le prix de revient de la fabrication des pièces.

Les problèmes d'établissement des gammes d'usinage relatifs aux lignes de fabrication continue de groupes de pièces ne peuvent être examinés qu'en regard des produits concrets. Les considérations générales concernant l'étude des réglages pour des groupes de pièces mis en œuvre isolément ou dans les lignes de fabrication par groupes peuvent être exposées en fonction de leur application à des types de machines particuliers.

Les réglages pour les groupes de pièces exécutées sur des tours revolver peuvent s'opérer suivant de nombreuses variantes.

La mise en place des ébauches sur des pinces extensibles ou des mandrins rend accessibles à l'usinage non seulement les surfaces extérieures et les bouts de la pièce, mais encore ses trous. En présence d'un système d'outils indépendants, un grand nombre d'outils susceptibles d'être montés sur une tourelle revolver et un porte-outil du chariot permettent d'exécuter les surfaces mentionnées dans les combinaisons diverses de leurs positions relatives et des spécifications dimensionnelles.

Les réglages pour les groupes de pièces qui ne demandent pas de retouches de réglage sont établis de façon à ne mettre à la cote qu'une partie des indexages de la tourelle revolver et du chariot, alors que les autres indexages sont prévus pour recevoir les outils

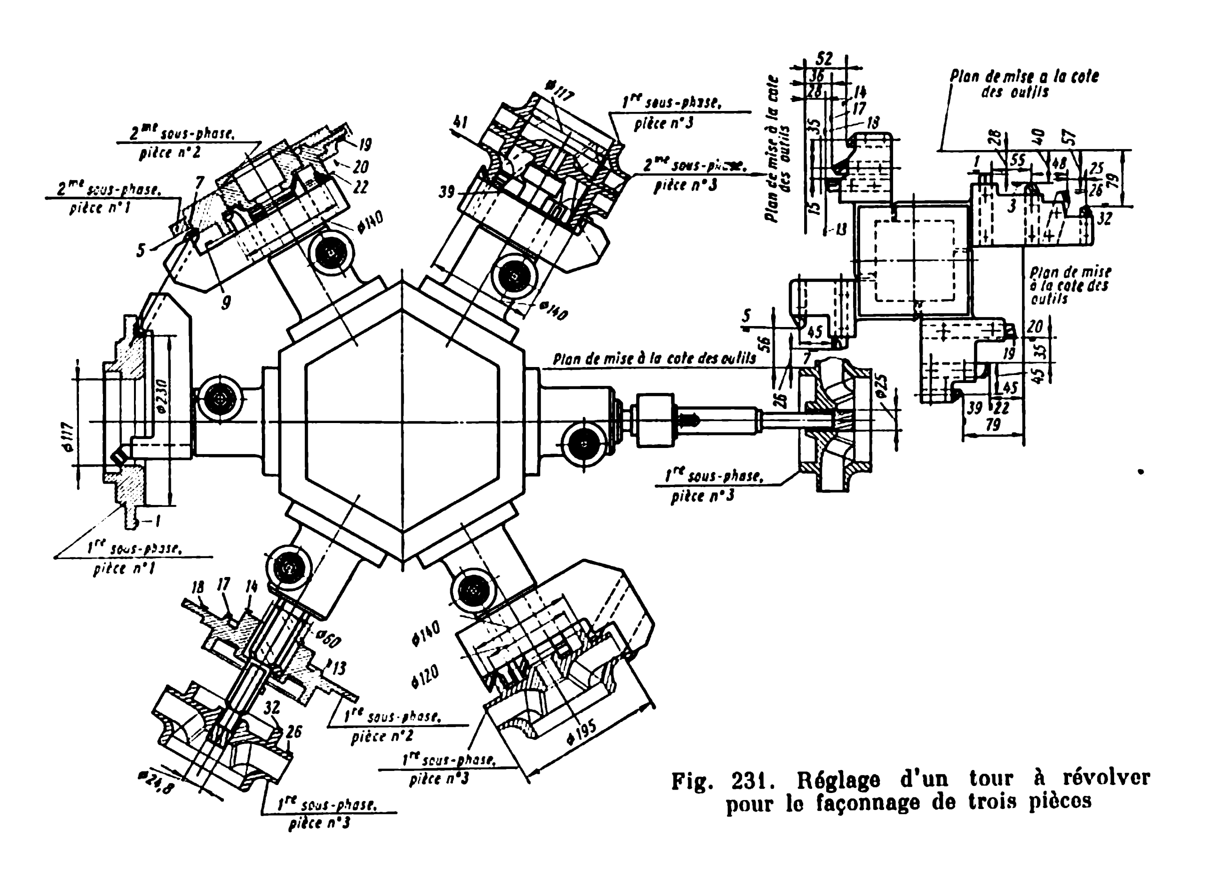


Fig. 231. Réglage d'un tour à révolver pour le façonnage de trois pièces

nécessaires au façonnage d'autres pièces du groupe ; certains indexages sont utilisés alors pour l'usinage de plusieurs pièces.

La figure 231 représente le réglage d'un tour à revolver pour le façonnage de trois pièces représentées sur la figure 232.

La pièce n° 3 est principale ; elle demande pour son usinage complet en deux sous-phases quatre indexages de la tourelle revolver dotée de treize outils, et quatre outils fixés sur le chariot.

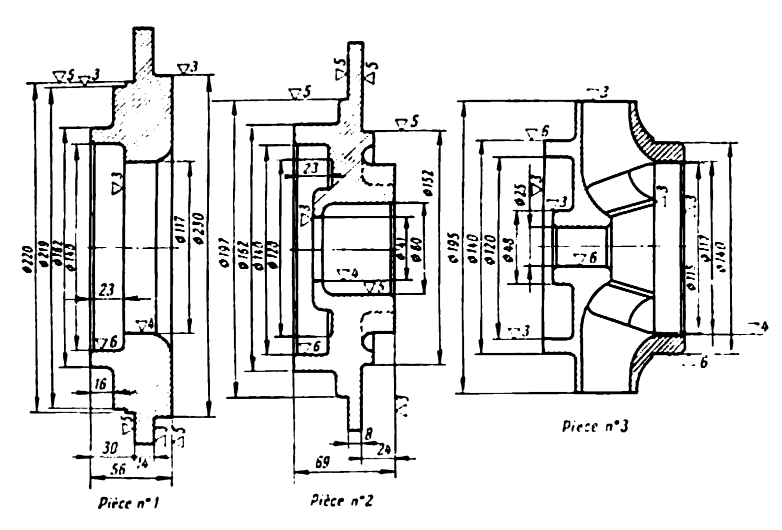


Fig. 232. Pièces exécutées avec réglage du tour à révolver représenté sur la fig. 231.

Les pièces n° 1 et n° 2 assurent la charge restante de la machine en demandant pour leur usinage complet en deux sous-phases dix outils répartis entre les trois indexages de la tourelle et huit outils fixés sur le chariot.

Le réglage pour un groupe de pièces permet d'appliquer des gammes d'usinage productives à la fabrication des pièces en série, de charger la machine et d'éliminer les pertes de temps pour des retouches de réglage périodiques.

Les outils portés par le chariot et prévus pour l'exécution de diverses pièces ou pour diverses sous-phases sont mis à la cote à partir d'une même surface de référence de façon qu'on puisse réaliser le dressage, la position du chariot étant constante tout au long du bâti ; si on ne parvient pas à le réaliser, on prévoit pour le chariot deux indexages.

La mise en place des pièces est assurée par les divers étages des mors avec positionnement suivant une surface de tenue extérieure

ou intérieure. La différence de profondeur entre les pièces serrées par les mors permet de simplifier la disposition des outils suivant les indexages de la tourelle et du chariot, ainsi que d'assurer la constance de la position des butées pour les indexages de la tourelle réalisant le façonnage de plusieurs pièces.

La figure 233 représente un mors de mandrin adapté à la mise en place des pièces suivant une surface de tenue extérieure ou intérieure; la bague d'entretoisement sert à modifier la position de la surface d'appui à l'un des étages.

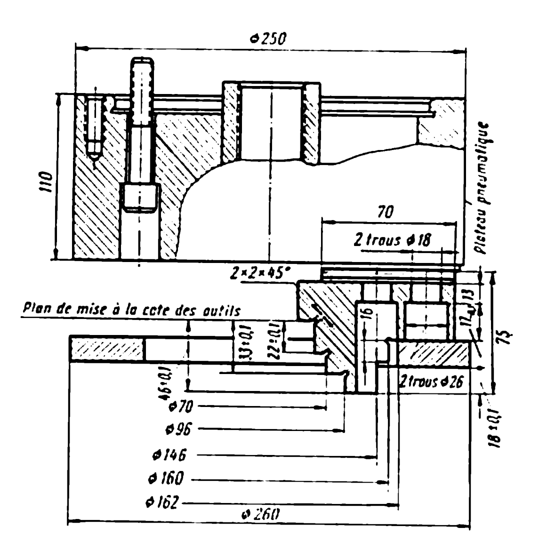


Fig. 233. Mors de mandrin pour la mise en place successive de plusieurs pièces avec réglage de groupe de la machine-outil

Les tours revolver à axe de rotation horizontal de la tourelle présentent de larges moyens de réalisation des réglages pour le façonnage des groupes de pièces petites et moyennes; les réglages de ces machines peuvent prévoir un nombre d'outils très grand, alors que le passage de la tourelle d'un indexage à l'autre est très bref.

L'idée d'une gamme d'usinage par groupe consiste à créer ce qu'on appelle une « pièce complexe » établie en fonction des spécifications géométriques et dimensionnelles du groupe, ainsi que des prescriptions de précision ; cette pièce cumule les éléments à façonner de tout le groupe des pièces; aussi établit-on pour elle la gamme d'usinage prévoyant le réglage de la machine; les pièces réelles dont chacune est plus simple que la « pièce complexe » sont façonnées avec ce réglage, certains outils et certains indexages n'entrant pas en action; les retouches de réglage sont peu importantes dans ces conditions.

La figure 234 donne une illustration de la méthode d'établissement d'une pièce complexe. Le repère *A* désigne la pièce complexe; les repères *B* à *F*, les pièces à combinaisons diverses de surfaces extérieures; les repères *G* à *K*, les pièces à combinaisons diverses de surfaces intérieures. Les surfaces analogues quant au mode d'usinage et de cotation similaire sont désignées par les mêmes chiffres.

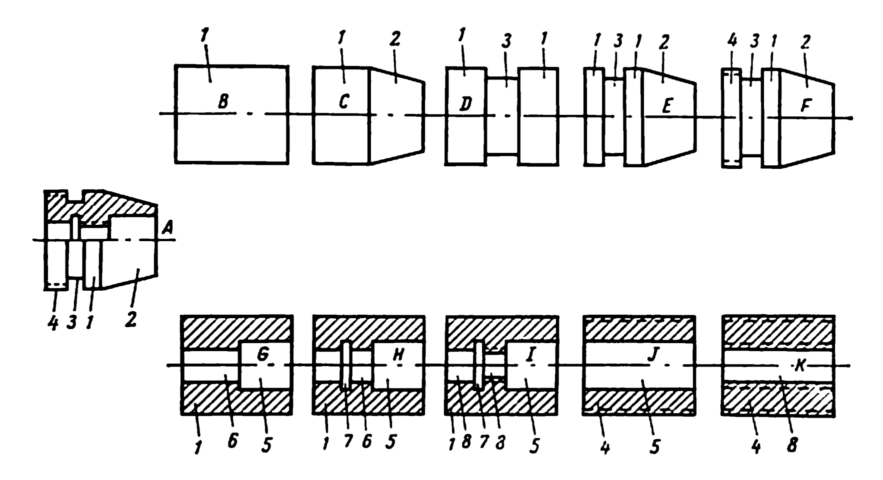


Fig. 234. Schématisation d'établissement d'une pièce complexe prévue pour être exécutée sur un tour revolver avec réglage de groupe

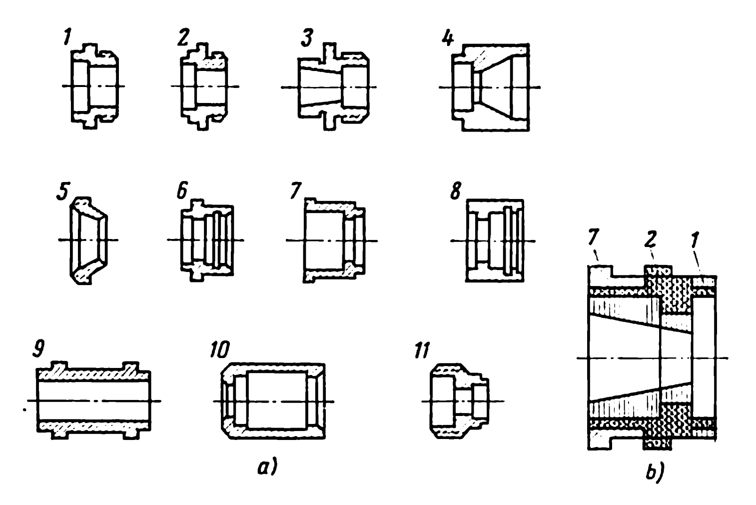


Fig. 235. Schéma d'établissement d'une pièce complexe par superposition des dessins

La figure 235 schématise l'établissement d'une pièce complexe pour un groupe de 11 pièces (fig. 235,*a*). Le point de départ pour l'établissement d'un dessin complexe a été le dessin de la pièce n° 7 sur lequel on a superposé les dessins des pièces n° 2, n° 1, etc. (fig. 235,*b*).

La retouche de réglage des tours revolver réglés pour façonner un groupe de pièces se fait : a) en remplaçant les blocs d'outils dans les tourelles et les chariots sans mise à la cote sur la machine ; b) en démontant les outils qui empêchent le façonnage d'autres pièces ; c) en remplaçant le mandrin ou en déplaçant ses mors qui sont bloqués ensuite.

L'établissement des réglages des tours à plateau horizontal, prévus pour la fabrication de groupes de pièces, est beaucoup plus simple. Généralement, la charge de ces machines est assurée par un nombre relativement petit de pièces qui, par contre, sont grosses et réclament une quantité de travail importante. Dans ces conditions, les possibilités de faire coïncider avantageusement les reprises sont accrues par le fait que les tours à plateau horizontal comportent une tourelle et un chariot permettant l'usinage des surfaces de révolution extérieures ainsi que des bouts.

Il faut s'efforcer d'éviter les retouches de réglage des montages, car, lorsque l'encombrement est important, cette opération demande beaucoup de temps.

Les réglages destinés au façonnage des groupes de pièces sur des tours semi-automatiques à une broche à outils multiples sont établis compte tenu des capacités indiquées ci-dessous.

Un réglage pour le façonnage d'un groupe de pièces peut être réalisé par serrage sur un mandrin de deux ou trois pièces diverses ayant une surface de tenue en forme de trou (fig. 236). Dans ces conditions, l'utilisation de la capacité de la machine quant au nombre des outils montés, à la puissance et à la charge est meilleure et permet d'obtenir une productivité accrue.

On peut parvenir à poser sur un mandrin deux ou trois pièces à trous de telle sorte que leurs étages et faces se disposent d'une manière analogue à celle d'une autre pièce (arbre, par exemple).

Il est possible également de réaliser des réglages pour des groupes dont chaque pièce est façonnée par des outils montés seulement à la demande de cette pièce dans une partie du chariot (près de la pointe ou de la contre-pointe). Le réglage prévoit que lorsqu'un outil est en action sur une pièce, les outils destinés au façonnage d'autres pièces n'atteignent pas la pièce considérée, ou passent sans la toucher.

La retouche de réglage des tours semi-automatiques à outils multiples pour le façonnage d'un groupe de pièces s'opère par rem-

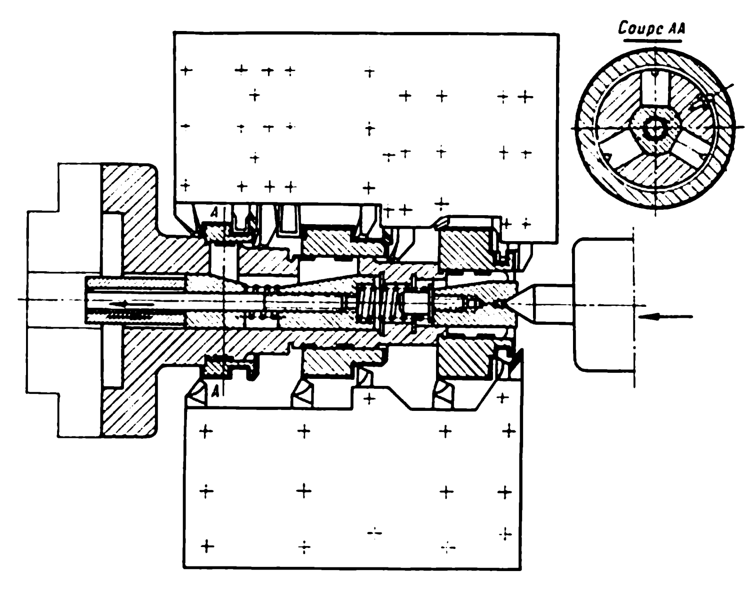


Fig. 236. Réglage de groupe d'un tour semi-automatique à outils multiples pour le façonnage de trois pièces serrées sur un mandrin

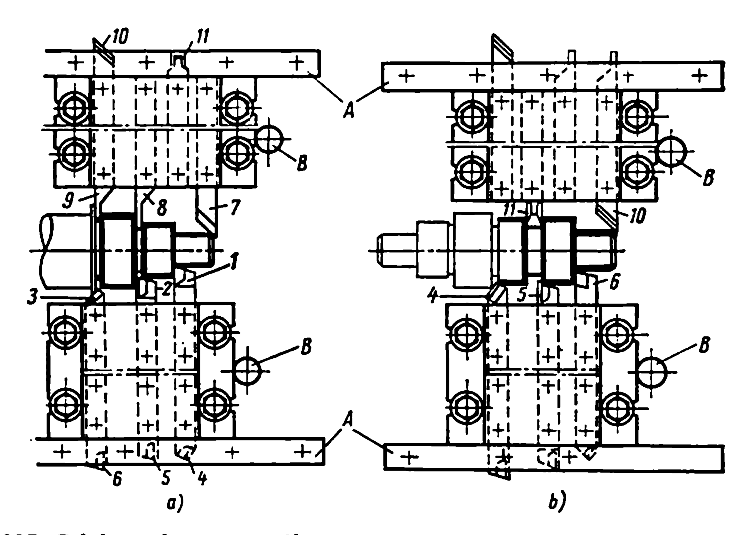


Fig. 237. Réglage de groupe d'un tour semi-automatique à outils multiples avec déplacement des blocs d'outils:

a — réglage n° 1 ; outils attaquant aux indexages *1, 2, 3, 7, 8, 9* ; *b* — réglage n° 2 ; outils attaquant aux indexages *4, 5, 6, 10* et *11*

placement des blocs d'outils ou par leur pivotement sur le chariot de la machine.

La figure 237 représente un réglage de groupe pour l'exécution des arbres de diamètres différents et de longueurs des portées différentes, réalisé par déplacement de divers blocs d'outils. La position des blocs par rapport à l'axe des centres est établie par les règles de butée A, et dans le sens de la longueur, par les butées B.

Les blocs, après leur pivotement sur l'axe, peuvent être verrouillés par une cheville.

Le réglage des tours semi-automatiques multibroches verticaux pour le façonnage d'un groupe de pièces se fait également à l'aide de blocs d'outils amovibles ou pivotants montés sur les chariots. Le façonnage de trois pièces s'effectue alors à l'aide des blocs triangulaires dont chaque côté porte un outil approprié.

Les réglages pour le façonnage d'un groupe de pièces sur des fraiseuses peuvent être très efficaces.

Pour l'exécution des plans les pièces doivent être placées sur le montage de telle façon que les surfaces façonnées se situent dans le même plan. L'usinage des pièces d'un lot peut être dans ces conditions soit simultané, soit isolé. Pour l'usinage simultané, on choisit des pièces qui s'apparentent quant à la largeur des surfaces façonnées.

L'usinage des rainures et des épaulements dans le cas du réglage pour un groupe de pièces prévoit l'utilisation de trains de fraises disposés suivant les indexages des montages de groupe. Il est alors difficile de façonner simultanément des pièces différentes, car il est compliqué de les disposer et d'assurer aux fraises une attaque et un dégagement sans obstacles.

La mise à la nouvelle cote des fraiseuses pour l'exécution des pièces d'un lot peut s'effectuer par des retouches de réglage en fin de la journée de travail, qui modifient la position des surfaces d'appui ; la mise en position de la table suivant les butées ou la mise à hauteur de la tête de fraisage dans le sens longitudinal ou transversal ; la dépose ou le remplacement de certains outils.

Les réglages des perceuses pour l'exécution des groupes de pièces sont étudiés pour remplacer le travail avec une broche par celui avec des broches multiples.

La figure 238 donne une schématisation d'usinage des leviers dans la fabrication en grande série sur une perceuse multibroche spéciale. Chaque indexage de la table prévoit l'ablocage des pièces dans les montages dont le réglage est corrigé.

La disposition des broches tient compte de l'entraxe de chaque pièce ; les broches ne sont armées que d'outils en action sur la pièce considérée. Les broches ne portant pas d'outils tournent à vide ; elles seront armées d'outils prévus pour l'usinage d'autres pièces.

D'après leur disposition, certaines broches peuvent agir sur plusieurs pièces.

On peut utiliser des unités multibroches montées sur des perceuses universelles. Du nombre total des broches prévues pour l'exécution de tous les trous du groupe de pièces, seules travaillent celles destinées à une action simultanée au cours de la phase considérée.

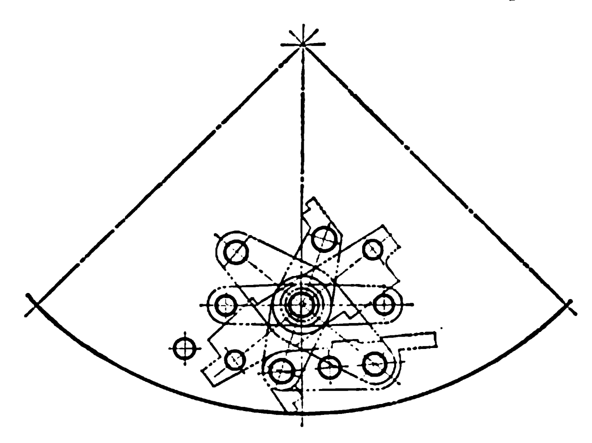


Fig. 238. Schéma d'usinage d'un groupe de pièces sur une perceuse multibroche spéciale

Ces mêmes principes président à l'établissement des réglages d'autres types de machines. L'établissement des gammes d'usinage des groupes de pièces se fait dans l'ordre suivant.

1. Choisir le groupe de pièces qui répondent aux prescriptions des réglages de groupe ; dresser la feuille de route, schématiser approximativement les réglages de groupe et définir d'une manière approchée les temps machine.

2. Etudier le réglage pour les pièces les plus importantes quant à leur complexité et le volume de leur fabrication au sein du groupe ; y ajouter les autres pièces ; établir le temps d'usinage par pièce et la charge de la machine.

3. Préciser les prescriptions imposées à la machine et, dans certains cas, définir les possibilités de modernisation ou de spécialisation d'une machine universelle, ou de l'étude d'une machine nouvelle.

4. Etudier la construction du montage et la mise à la cote des outils ; préciser les régimes et allouer définitivement les temps.

5. Constituer le dossier de fabrication contenant tous les renseignements sur l'exécution de chaque pièce ainsi que les dessins d'assemblage.

Les gammes de fabrication sont rédigées avec établissement de dessins suivant les schémas dressés dont l'ensemble constitue le dossier de fabrication.

Il n'existe pas de forme unique pour les divers documents de ces dossiers. Chaque usine de construction mécanique et chaque Bureau d'études établissent généralement eux-mêmes les formes de documentation en fonction du type de la production et d'autres particularités. Dans certains cas, les formes de documentation sont imposées par des références fournies par les départements.

Le dossier de fabrication des pièces mécaniques comporte le dessin d'exécution de la pièce, la feuille de la gamme d'usinage ou la feuille de route, la feuille d'instructions détaillées, la feuille du réglage de la machine, la fiche des temps, la fiche des outils. D'autre part, on compose des esquisses de phases et souvent celles des mises en place et des reprises.

Le dessin d'exécution de la pièce doit contenir toutes les données nécessaires à la fabrication de celle-ci et correspondre aux prescriptions fonctionnelles imposées par la fabrication des pièces mécaniques.

La feuille de route est établie pour chaque pièce. C'est un résumé sommaire de toutes les données essentielles fournies par les feuilles d'instructions. Elle indique le routage de la pièce au sein de l'atelier et, parfois, de tous les ateliers et des magasins pendant toute sa fabrication. On porte sur cette feuille l'ordre successif des phases de la gamme ; elle constitue ainsi un plan général de l'exécution des phases.

La feuille de la gamme d'usinage est rédigée également pour chaque pièce ; on y trouve consignées toutes les phases de la gamme. Elle se distingue de la feuille de route par l'indication de la succession des phases et l'ordonnancement des sous-phases, des indexages et des reprises. La dénomination d'une reprise définit l'objectif à atteindre par le travail prévu. Les modes d'ablocage ou de déblocage de la pièce ainsi que de retournement sont consignés comme des reprises. Les surfaces usinées sont désignées par les symboles portés sur les dessins d'exécution de la phase ou par les dimensions de ces surfaces fournies par les dessins des pièces finies. Les surfaces d'appui sont repérées à l'aide de symboles adoptés.

Les feuilles d'instructions sont rédigées pour chaque phase décrite d'une façon plus détaillée que dans les feuilles de gamme ; elles comportent des dessins d'exécution des phases et parfois des reprises. Lorsque la phase est réalisée sur des machines automatiques ou semi-automatiques, ces feuilles servent de feuilles de réglage de la machine, tandis que les dessins des phases et des reprises servent de dessins de réglage de la machine.

Les fiches des temps ne servent que pour déterminer les temps et sont composées pour chaque phase d'une production bien établie

dans laquelle les temps d'exécution et les devis doivent être argumentés avec précision.

Les fiches des outils indiquent la liste des montages et des outils prévus pour l'exécution de chaque phase de la gamme. Elles sont constituées sur la base des feuilles de gamme ou d'instructions et prévues pour les magasins d'outillage qui fournissent les appareillages aux postes de travail.

Les formes de la documentation examinée sont définies par la destination des gammes établies pour tel ou tel volume des séries du produit à fabriquer.

Il a été établi par expérience qu'un dossier de fabrication bien rédigé est la condition d'un planning judicieux et contribue à la fabrication de produits de qualité imposée. La mise en œuvre des gammes de fabrication conformes aux études technologiques réalisées et l'observation de la discipline technologique président à la mise en valeur des techniques nouvelles, à l'utilisation judicieuse des moyens de production, à l'économie de temps, de travail, de matériaux et d'énergie.

§ 3. Analyse comparative technique et économique des gammes d'une fabrication mécanique

Temps comme critère d'appréciation d'une phase. Calcul du temps d'usinage par pièce et par lot.

Coefficients de temps machine, de temps de préparation, d'utilisation de matière d'œuvre; coefficient de charge de l'équipement; le rôle de ces coefficients pour le choix de diverses variantes des gammes d'usinage.

Confrontation suivant la quantité de travail des procédés d'obtention individuelle et automatique des cotes. Etablissement du volume d'un lot équivalent pour les deux procédés. La quantité de travail, critère d'appréciation d'un mode de fabrication.

Notion du prix de revient d'une pièce. Calcul du prix de revient des produits en construction mécanique.

Objectifs de l'analyse technique et économique des modes de production. Système des indices techniques et économiques définissant les modes de production.

Chaque phase de même que chaque gamme peuvent être établies en plusieurs variantes techniquement équivalentes. Le choix entre ces variantes s'effectue sur la base d'une analyse technique et économique, en les comparant à l'aide d'un système d'indices définissant leur efficacité et leur rentabilité.

La phase est un élément de base du calcul d'une gamme de fabrication ; lors de l'établissement de cette dernière, le temps d'exécution d'une phase est le critère déterminant de son application rationnelle dans les conditions du programme de fabrication considéré.

On appelle temps le délai nécessaire pour l'exécution d'une phase dans les conditions les plus favorables pour la production considérée.

Le temps d'exécution est établi en fonction des capacités de l'équipement, de l'outillage et d'autres moyens de fabrication, en appliquant les procédés de travail conformes aux réalisations techniques actuelles et compte tenu de l'expérience des novateurs de la production.

En divisant l'unité de temps (minute, heure, journée de travail) par le temps d'exécution, on obtient la norme de productivité de travail (par cette unité de temps).

La norme de productivité ou productivité tout court est une valeur inverse au temps d'exécution ; elle est exprimée en nombre de produits (ou en quantité de travail) devant être fabriqués par unité de temps.

Dans une fabrication mécanique, la productivité du travail dépend dans une grande mesure des capacités d'exploitation de l'équipement, définies par les limites de capacité de l'équipement, c'est-à-dire par les paramètres essentiels qui déterminent ses propriétés d'exploitation. Ces paramètres sont consignés généralement sur les livrets des machines.

Ainsi, pour un marteau-pilon à vapeur ou à air comprimé à un jambage, ces paramètres sont le poids de la masse tombante, la course du mouton, le porte-à-faux de la tige, etc. ; pour une machine-outil, ce sont le nombre de tours ou de courses par minute, l'avance, les couples moteur, etc.

Il arrive que la capacité des machines peut être accrue par rapport à celle consignée sur le livret ; toutefois, ces corrections ne peuvent être effectuées qu'après un calcul minutieux de l'usure, du broutement, des charges admissibles, etc.

On distingue trois modes d'étude des temps : 1) statistique, 2) analytique et 3) comparatif.

Le mode statistique établit le temps imparti à l'exécution de toute la phase, sans tenir compte des délais d'exécution de ses éléments ; ces calculs se font sur la base des données statistiques concernant les frais de temps réels moyens pour l'exécution de phases analogues.

Ces temps d'exécution se fondent sur une productivité de travail acquise antérieurement, sans tenir compte des capacités de fabrication, des acquis de la technique et de l'expérience des ouvriers d'avant-garde, ce qui n'engage pas les ouvriers à augmenter la productivité. Il convient donc de recourir le moins possible à ce mode d'étude des temps.

Le mode analytique définit les temps d'exécution par calcul de la durée des éléments de travail en établissant analytiquement la succession et le contenu des manipulations de l'ouvrier (opérateur) et des mouvements de la machine-outil fonctionnant dans les conditions d'exploitation les plus avantageuses.

Le mode comparatif établit le temps d'exécution pour l'ensemble de la phase en confrontant la phase considérée avec une phase analogue d'une ébauche semblable mais d'autres dimensions, pour laquelle le temps d'exécution établi par le mode analytique est déjà alloué.

Ce mode convient lorsqu'on procède à l'établissement des ateliers, quand les temps approximatifs peuvent suffire.

Le temps d'exécution et la norme de productivité sont calculés pour chaque phase. Ils sont les critères essentiels pour apprécier une phase, car ils indiquent si la structure de la phase établie correspond au programme imposé.

Le temps d'usinage par pièce obtenu par calcul tient compte non seulement du temps machine, mais également du temps des arrêts inévitables dans le travail et du temps nécessaire pour desservir le poste.

On appelle temps opérationnel celui dépensé directement pour l'exécution de la phase considérée.

Le temps opérationnel se reproduit pour chaque pièce, ensemble ou produit ; lorsque l'usinage se fait par plusieurs pièces, il se reproduit dans un ordre défini après l'exécution d'un certain nombre d'ébauches, correspondant à la capacité du lot.

Le temps perdu relatif au personnel est le temps réglementé par les conditions de travail et prévu pour les repos périodiques de l'opérateur lors des travaux pénibles; si d'après les conditions de travail le repos n'est pas prévu, c'est le temps nécessaire pour satisfaire les besoins naturels de l'ouvrier.

Le temps perdu relatif au matériel est le temps nécessaire à l'ouvrier pour maintenir son poste en état de travail. Il comprend : 1) le temps d'organisation T_{org} employé pour la révision et la vérification du fonctionnement des appareillages, la disposition et le rangement des outils au début et à la fin de la journée de travail, le graissage des appareillages, le nettoyage des copeaux ; 2) le temps de la desserte technique T_t, nécessaire pour remplacer les outils, les retouches de réglage de l'appareillage, le montage et la mise à la cote des outils.

Le temps d'usinage par pièce (T_p) est défini par la somme de ses éléments :

$$T_p = T_{op} + T_{per} + T_{mat} = T_{op} + T_{per} + T_{org} + T_t \text{ mn}, \qquad (153)$$

où T_{op} est le temps opérationnel par pièce et par minute;
T_{per}, le temps perdu relatif au personnel par pièce et par minute ;
T_{mat}, le temps perdu relatif au matériel par pièce et par minute;

$$T_{mat} = T_{org} + T_t.$$

Pour calculer le temps d'usinage par pièce, le temps perdu relatif au personnel et le temps d'organisation sont définis par les

formules

$$T_{per} = \frac{t_{per}}{100} T_{op}, \tag{154}$$

$$T_{org} = \frac{t_{org}}{100} T_{op}, \tag{155}$$

où t_{per} est le pourcentage du temps perdu relatif au personnel par rapport au temps opérationnel;

t_{org}, le pourcentage du temps d'organisation du poste de travail par rapport au temps opérationnel.

Ainsi, le temps d'usinage par pièce peut s'exprimer par la formule

$$T_p = \left(1 + \frac{t_{per}}{100} + \frac{t_{org}}{100}\right) T_{op} + T_t. \tag{156}$$

Le temps opérationnel est constitué de temps machine et de temps secondaire.

Le temps machine est celui pendant lequel l'objet de la fabrication modifie son état (sa forme et ses dimensions, la structure et les propriétés de la matière d'œuvre, etc.), ce qui est le but de la phase considérée.

Le temps secondaire est celui nécessaire pour réaliser le travail de préparation susceptible d'assurer l'exécution du travail essentiel. Il comprend le temps nécessaire pour effectuer la mise en place, l'ablocage et le déblocage de l'ébauche usinée ou de l'ensemble monté, la commande de la marche des appareillages, les mesures, etc.

Le temps secondaire se subdivise en temps chevauché par le temps machine et en temps qui ne l'est pas. Le temps opérationnel ne tient pas compte des frais de temps nécessaires pour l'exécution des mouvements élémentaires et, en général, des actions manuelles qui peuvent être produits pendant le fonctionnement automatique de la machine; ainsi le temps opérationnel n'englobe que le temps secondaire qui n'est pas chevauché par le temps machine.

Lors de l'usinage sur des machines automatiques, le temps secondaire qui devient alors le temps machine s'appelle souvent le temps des courses à vide; il comprend l'approche et le recul automatiques des chariots, l'approche des outils de l'ébauche dès l'action automatique de l'avance d'exécution, etc.; ainsi pour des phases manuelles

$$T_{op} = T_m + T_s, \tag{157}$$

et pour des phases automatisées

$$T_{op} = T_m + T_{cv}, \tag{158}$$

où T_m est le temps machine;

T_s, le temps secondaire;

T_{cv}, le temps des courses à vide.

Les courses à vide sont effectuées soit aux mêmes avances par minute que le travail principal, soit avec des avances accélérées. Les mouvements secondaires et les courses à vide de certaines machines automatiques se font avec des vitesses constantes indépendantes des régimes d'usinage.

Lors du façonnage sur une machine-outil, le temps machine nécessaire pour l'exécution de chaque reprise ou de chaque passe de l'outil (t_m) est défini par la formule

$$t_m = \frac{L_u}{a_m} \text{ mn}, \tag{159}$$

où L_u est la longueur d'usinage calculée (le chemin parcouru par l'outil ou l'ébauche dans le sens de l'avance) en mm;

a_m, la valeur de l'avance (vitesse de l'avance) en mm/mn.

La longueur d'usinage calculée est composée de la longueur de la surface usinée dans le sens de l'avance, majorée de la longueur d'approche de l'outil jusqu'à l'ébauche, l'avance une fois couplée, et des longueurs de l'engagement de l'outil et de son dégagement.

Il arrive que l'engagement et le dégagement n'ont pas lieu, comme dans le cas du lamage ou du fraisage cylindrique, du fraisage conique, du fraisurage et de l'alésage des trous coniques. Dans ces cas, la longueur de la course de l'outil est limitée généralement par une butée; en fin d'usinage, avant le recul, l'outil fait alors un ou deux tours à vide (sans avance).

En partant de la formule initiale du temps machine, on peut obtenir t_m pour tout mode d'usinage quelles que soient les conditions réelles. Il en est ainsi, notamment, pour le chariotage cylindrique

$$t_m = \frac{L_u}{a_m} = \frac{L_u}{na},$$

où n est le nombre de tours que fait l'ébauche par minute;

a, l'avance en mm/tr.

Lors du calcul du temps principal machine et main, la valeur des avances manuelles est calculée sur la base des observations préalables systématisées; dans ces conditions, la valeur de l'avance est fonction des aptitudes de l'opérateur.

Lorsque la phase est constituée de reprises multiples, le temps principal machine est défini par la somme des temps principaux machine des reprises successives de la phase:

$$T_m = \sum_{i=1}^{m} t_m, \tag{160}$$

où m est le nombre de reprises successives.

L'étude du temps principal main (ajustage et montage) s'effectue suivant les normes, compte tenu des facteurs technologiques essen-

tiels qui définissent les délais des travaux. Ces délais sont établis par l'observation du temps de travail.

Le temps secondaire machine et main et le temps main sont calculés en partant des références qui tiennent compte des facteurs essentiels régissant la durée des opérations secondaires (poids de l'ébauche, type de la machine et du montage, etc.).

Le temps perdu relatif au personnel est calculé en pour cent du temps opérationnel suivant des références qui rendent compte des conditions de l'exécution du travail.

Lorsqu'on travaille sur des machines-outils, ce temps vaut généralement 2 % du temps opérationnel. Pour les travaux de montage, il s'accroît jusqu'à 7 % du temps opérationnel pour tous les opérateurs de la ligne d'assemblage.

Le temps d'organisation T_{org} est défini en pour cent du temps opérationnel suivant des références constituées par les résultats de l'étude systématisée des temps au cours d'une journée de travail. Pour les travaux sur une machine-outil, le temps d'organisation est pris généralement égal à 0,6 ou 7,1 % du temps opérationnel, suivant le type et les dimensions de la machine. Pour les travaux d'ajustage et de montage, il constitue de 2 à 8 % du temps opérationnel, suivant le genre des travaux à effectuer.

Le temps de la desserte technique est parfois calculé en pour cent du temps principal, mais cette méthode peut fausser sensiblement les calculs. Il est mieux d'établir ce temps par calcul.

Pour l'usinage sur une machine-outil la formule est la suivante

$$T_t = \frac{t_r n_r + t_a n_a + T_{out}}{n_{éb}}, \qquad (161)$$

où t_r est le temps nécessaire pour chaque retouche de réglage;

n_r, le nombre des retouches de réglage de l'outil jusqu'à son remplacement;

t_a, le temps nécessaire pour chaque réaffûtage de l'outil;

n_a, le nombre de réaffûtages de l'outil jusqu'à son remplacement;

T_{out}, le temps nécessaire pour le remplacement de l'outil émoussé;

$n_{éb}$, le nombre d'ébauches façonnées par l'outil jusqu'à son remplacement.

Lorsque les vitesses de coupe sont élevées, l'usure thermique de l'outil précède son usure mécanique. Les retouches de réglage en cours d'usinage n'ont alors pas lieu, mais le réaffûtage se fait après le façonnage de chaque ébauche; ainsi

$$T_t = \frac{T_{out}}{n_{éb}} + t_a.$$

Pour le dégrossissage, avant d'être remplacé, l'outil peut travailler jusqu'à son remplacement sans retouche de réglage et réaffûtage ; alors

$$T_t = \frac{T_{out}}{n_{éb}} .$$

Le temps alloué à la retouche de réglage, au réaffûtage et au remplacement des outils est imposé par les références. Le nombre d'ébauches façonnées par l'outil jusqu'à son remplacement peut être calculé suivant la formule

$$n_{éb} = \frac{T}{t_m} , \qquad (162)$$

où T est la tenue de l'outil, c'est-à-dire la durée de son service jusqu'à l'émoussage en mn ;

t_m, le temps principal d'usinage par pièce de l'outil en mn.

Ainsi, on obtient :

$$T_t = \frac{T_{out} t_m}{T} , \qquad (163)$$

formule qui montre qu'il existe une relation entre le temps de la desserte technique et le temps machine.

Pour certains travaux sur une machine-outil, le temps de la desserte technique est nul ou infiniment petit ; il en est ainsi, par exemple, pour le calibrage à la bille ou au mandrin, l'exécution d'un trou par brochage, lorsque ce temps n'est employé que pour nettoyer l'outil des copeaux qui restent entre les dents de la broche.

Dans les travaux d'ajustage et de montage, le temps de la desserte technique est nul (travail au marteau, à la clé) ou a une certaine valeur ; par exemple, lors du limage (nettoyage de la lime à la brosse), du grattage (affûtage du grattoir), du rivetage (remplacement de la bouterolle).

La norme de productivité est définie comme le quotient de l'unité de temps par le temps d'exécution en mn par pièce :

$$N_h = \frac{60}{T_p} , \qquad (164)$$

$$N_{jt} = \frac{60 T_{jt}}{T_p} , \qquad (165)$$

où N_h est la norme de productivité par heure ;

N_{jt}, la norme de productivité par journée de travail ;

T_{jt}, la durée de la journée de travail en heures ;

T_p, le temps d'exécution par pièce en mn.

La norme de productivité est une caractéristique de la productivité du travail ; après avoir établi le temps d'exécution par pièce

pour les diverses variantes de la phase, on peut les confronter d'après leur productivité.

Lorsque les ébauches sont façonnées par lots, le temps de préparation $T_{prép}$ est utilisé par l'opérateur: pour étudier le travail à réaliser et le dessin, préparer l'appareillage, les montages et les outils et assurer leur réglage, pour le façonnage du lot d'ébauches considéré ou le montage du lot d'ensembles, pour démonter et rendre au magasin l'appareillage (montages, outils) une fois le travail imposé fini, et pour présenter à la réception les produits fabriqués. Dans la fabrication en grande série, lorsque les mêmes phases reviennent périodiquement, ainsi que sur les lignes automatiques des machines-outils réglées pour la fabrication des groupes de pièces, le temps de préparation est nécessaire surtout pour réaliser le réglage de l'équipement.

Le temps de préparation dépend de l'équipement avec lequel le travail est exécuté, du caractère du travail, de la complexité du réglage et ne dépend pas du volume du lot ; il est donc établi à part du temps d'exécution par pièce.

Ainsi, lors du façonnage par lots, le temps d'exécution pour le lot considéré (T_{lot}) :

$$T_{lot} = T_{prép} + T_p n_p, \tag{166}$$

où $T_{prép}$ est le temps de préparation indépendant du volume du lot ;
T_p, le temps d'exécution par pièce ;
n_p, le nombre de pièces par lot.

Plusieurs valeurs faisant partie des temps d'exécution par pièce et par lot sont définies par des références établies au cours de l'observation du temps de travail. Les temps de référence, c'est-à-dire les délais calculés des éléments de travail, sont prévus pour des éléments types et destinés pour le calcul des temps. L'application du mode de calcul analytique n'est possible que sur la base des temps de référence.

L'étude du temps par observation se fait à l'aide de deux procédés essentiels: le chronométrage et l'étude du temps de travail.

Le chronométrage permet d'étudier les temps nécessaires à l'exécution des éléments de travail manuels et mécaniques d'une phase qui se répètent périodiquement afin de définir leur durée normale et, sur cette base, d'établir les normes pour le calcul des temps.

L'étude du temps de travail se fait par observation et par mesure successive de tous les frais du temps de travail pendant la journée, y compris les pertes de temps.

L'objectif essentiel de cette étude est de déterminer les pertes de temps, d'établir les temps perdus relatifs au matériel, les temps perdus relatifs au personnel, etc.

Lorsqu'on choisit une variante de gamme d'usinage, il est très important de trouver des indices permettant d'apprécier d'une ma-

nière objective des gammes confrontées et définissant leurs avantages ne serait-ce qu'approximativement.

Ces indices peuvent être les coefficients qui caractérisent le rôle spécifique des éléments constitutifs de la quantité de travail, les coefficients d'utilisation des matières d'œuvre et ceux d'utilisation de l'équipement.

Examinons quelques indices et considérons les domaines de leur application.

En utilisant les formules prévues pour le calcul des temps d'usinage par pièce, on peut établir une relation entre ses éléments en définissant le coefficient du temps machine η_m en tant que quotient du temps machine T_m par le temps d'usinage par pièce T_p.

Ce coefficient définit la part spécifique du temps machine dans le temps d'usinage par pièce relatif à l'exécution de toute la phase. Le coefficient de temps machine important témoigne d'une structure avantageuse de la phase. Pourtant les diverses variantes d'une phase ne peuvent être confrontées que lorsque les régimes de coupe considérés sont optimaux, car la minimisation des régimes de coupe augmente le temps machine et, donc, son coefficient. Le coefficient de temps machine trop bas témoigne de frais de temps importants pour des opérations secondaires (mise en place et démontage des ébauches, etc.), pour la retouche de réglage et le remplacement des outils [1].

La valeur du coefficient du temps machine principal varie dans de larges limites ; il ne peut donc caractériser les avantages des phases comparées que lorsqu'elles sont tout à fait analogues et ne se distinguent que par la succession des reprises, la construction des montages, etc. On ne peut pas l'employer pour évaluer des méthodes différentes. Ainsi, le brochage est un procédé productif, alors que son temps machine est beaucoup plus bas que celui de l'alésage, par exemple ; cela s'explique par la faible valeur du temps machine du brochage résultant de la trajectoire relativement très courte que l'outil parcourt dans le sens de l'avance, définie par le mode d'usinage lui-même. Pour apprécier les phases faisant appel à divers modes d'usinage, on compare leur productivité.

L'usinage à grandes vitesses de coupe ou avec des avances accrues réduit le temps machine, et donc son coefficient. Cette circonstance n'implique, certes, pas le refus de travailler à des vitesses de coupe élevées ou avec des avances accrues ; elle ne fait que souligner la nécessité pressante de réduire par des mesures appropriées les frais de temps pour des opérations secondaires, la retouche de réglage et le remplacement des outils [2], tout en augmentant les régimes de coupe.

[1] L'Annexe 6 donne les valeurs du coefficient du temps principal machine pour le travail sur des machines-outils.

[2] Voir chapitre VIII, § 1, « Moyens d'accroître la productivité du travail ».

Le coefficient du temps machine pour l'exécution totale de l'ébauche $\eta_{m_{éb}}$ est défini comme la valeur moyenne des coefficients du temps machine nécessaire pour l'exécution de toutes les phases constitutives de la gamme d'usinage

$$\eta_{m_{éb}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \eta_{m}, \tag{167}$$

où m est le nombre de phases de la gamme d'usinage de l'ébauche.

Dans la fabrication sérielle, les variantes comparables des gammes sont caractérisées dans une certaine mesure par le coefficient du temps de préparation :

$$\eta_{prép} = \frac{T_{prép}}{T_p n_{lot}}, \tag{168}$$

où n_{lot} est le nombre d'ébauches par lot.

Ce coefficient dépend du volume du lot et varie de 0,04 à 0,25 suivant le volume de la série; plus elle est grande, plus la valeur de $\eta_{prép}$ est faible. Ce coefficient permet d'apprécier les phases analogues.

Le coefficient d'utilisation de la matière d'œuvre γ est défini par le quotient du poids de la pièce finie g par le poids de l'ébauche G :

$$\gamma = \frac{g}{G}. \tag{169}$$

Ce coefficient caractérise le mode de fabrication de la pièce dans son ensemble, y compris l'exécution de l'ébauche. Il peut être établi soit par rapport au poids de la pièce fournie par la section d'usinage-ébauche, soit par rapport au poids de la pièce brute. On peut l'utiliser pour définir les avantages que présente le remplacement d'une pièce prise dans la masse par une construction soudée ou d'un ensemble monté par pièce, du point de vue de l'économie du métal. Un poids relativement faible des pièces et des ensembles ne correspond pas toujours à des frais plus petits en matières de départ.

Voici quelques données empiriques sur les coefficients d'utilisation du métal. Moulages de fonte en sable à la machine suivant des modèles métalliques: pièces de support, γ = 0,8 à 0,9; bagues et chemises, γ = 0,5 à 0,6; petites poulies et volants, γ = 0,7 à 0,9. Estampage de pièces en acier sur des marteaux-pilons: leviers et fourchettes, γ = 0,8 à 0,95; arbres à fusées et à flasques, γ = 0,70 à 0,85; pignons à denture fraisée, γ = 0,35 à 0,55; arbres lisses à trous centraux, γ = 0,35 à 0,55.

Dans les conditions d'une fabrication continue l'indice caractéristique de la gamme d'usinage est ce qu'on appelle les temps morts de l'équipement; ils résultent des écarts entre les temps pièce réels

d'usinage et d'assemblage, et la cadence de la chaîne. Cet indice est lié au coefficient de charge de l'équipement.

Le nombre de postes de travail ou de machines de la ligne (m_l) susceptibles d'assurer l'exécution de la phase pour le nombre de pièces défini par le programme s'obtient comme le quotient du temps d'usinage par pièce par la cadence:

$$m_l = \frac{T_p}{t}, \tag{170}$$

où T_p est le temps d'usinage par pièce pour une phase;
t, la cadence du travail.

En arrondissant par excès la valeur calculée de m_l jusqu'au nombre entier immédiatement supérieur m_n, on trouve le nombre de machines à utiliser. Le quotient du nombre calculé de machines par le nombre de machines utilisées définit le coefficient de leur charge η_c:

$$\eta_c = \frac{m_l}{m_n}. \tag{171}$$

En remplaçant dans la formule (170) la valeur de la cadence par celle donnée par la formule (1), on obtient

$$m_l = \frac{T_p}{t} = \frac{T_p N}{F}$$

et donc

$$\eta_c = \frac{m_l}{m_n} = \frac{T_p N}{F m_n},$$

où F est le fonds annuel du fonctionnement de l'équipement en mn;
N, la production annuelle en pièces.

Le coefficient de charge d'une ligne continue est la moyenne des coefficients de charge des postes de travail isolés:

$$\eta_{cl} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \eta_c, \tag{172}$$

où m est le nombre de machines de la ligne.

Suivant les données pratiques, le coefficient de charge courant d'une ligne varie de 0,65 à 0,8.

En utilisant les formules (171) et (170) on obtient

$$T_p = t m_n \eta_c.$$

Dans le cas d'une charge à 100 % des postes de travail, c'est-à-dire lorsque $\eta_c = 1$, $T_p = t m_n$, le temps mort inévitable T_{tmi} est défini donc par la différence

$$T_{tmi} = t m_n - t m_n \eta_c = t m_n (1 - \eta_c). \tag{173}$$

Ainsi pour une cadence $t = 2{,}95$ mn, deux postes de travail et $\eta_c = 0{,}8$, il vient

$$T_{tmi} = 2{,}95 \cdot 2\,(1 - 0{,}8) = 1{,}18 \text{ mn.}$$

Dans les conditions d'une fabrication en série, lorsque la machine exécute non pas une mais plusieurs phases, le coefficient de charge se calcule compte tenu de toutes les phases exécutées sur la machine et ne peut donc pas servir de critère pour apprécier la phase étudiée.

Dans la fabrication en série le coefficient général de charge des machines η_c varie de 0,70 à 0,85 ; on n'y recourt pourtant pas lors de l'analyse comparative des gammes d'usinage en ne l'utilisant que lors de l'étude des ateliers de fabrication sérielle.

En fabrication sérielle, le choix d'une variante d'usinage des ébauches sur des machines impose non seulement la confrontation des temps d'usinage par pièce, mais également le calcul du temps nécessaire pour assurer la retouche de réglage des appareillages pour l'exécution de plusieurs lots d'ébauches. Ainsi l'avantage que présente la productivité de la variante considérée est défini, en somme, par la comparaison des temps d'usinage des lots.

Vérifions s'il est plus avantageux d'établir une phase sur la base du procédé d'obtention automatique ou individuelle des cotes. Le procédé d'obtention automatique des cotes est justifié du point de vue de la quantité de travail à la condition que :

$$T'_{prép} + T'_p n > T''_{prép} + T''_p n,$$

où $T'_{prép}$ est le temps de préparation ;

T'_p, le temps d'usinage par pièce lors de l'obtention individuelle des cotes (par des passes d'essai et des mesurages) ;

$T''_{prép}$, le temps de préparation ;

T''_p, le temps d'usinage par pièce lors de l'obtention automatique des cotes (sur une machine réglée à l'avance) ;

n, le nombre d'ébauches par lot.

Cette condition permet de tirer

$$T'_p n - T''_p n > T''_{prép} - T'_{prép},$$

d'où

$$n > \frac{T''_{prép} - T'_{prép}}{T'_p - T''_p}.$$

Lorsque le volume du lot est inférieur à n, le procédé d'obtention automatique des cotes n'est pas justifié du point de vue de la quantité de travail. Si le nombre d'ébauches du lot est n, les variantes comparées sont équivalentes pour ce qui est des frais totaux du temps nécessaire pour l'usinage du lot.

Sur l'axe des abscisses de la figure 239 on porte les volumes du lot n, et sur l'axe des ordonnées, le temps nécessaire pour l'usinage du lot T_{lot} et ses éléments, $T_{prép}$ et $T_p n$; si le volume du lot est n_{lot}, les deux variantes sont équivalentes, c'est-à-dire T'_{lot} est égal à T''_{lot}; dans ces conditions

$$T'_p n_{lot} - T''_p n_{lot} = T''_{prép} - T'_{prép},$$

d'où

$$n_{lot} = \frac{T''_{prép} - T'_{prép}}{T'_p - T''_p}. \quad (174)$$

Pour un lot inférieur à n_{lot}, la première variante est préférable, pour un lot supérieur à n_{lot}, c'est la deuxième variante qu'il faut choisir.

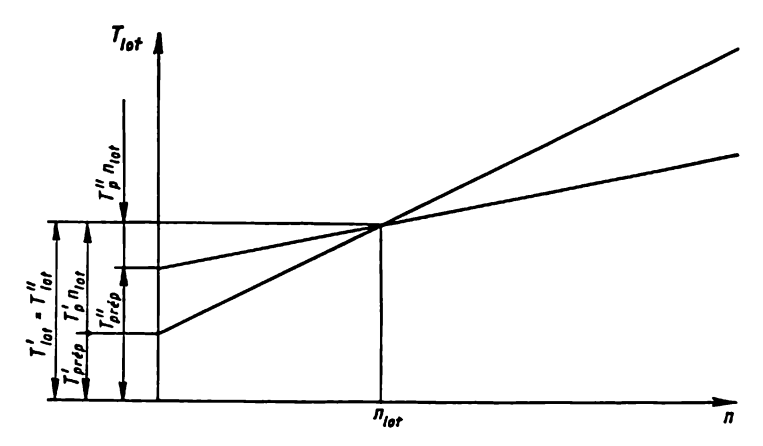


Fig. 239. Illustration de l'établissement du volume d'un lot analogue n_{lot} pour les variantes équivalentes

Pour confronter les diverses variantes d'une gamme d'usinage et pour les comparer avec les modes de fabrication des pièces identiques dans des conditions analogues de la fabrication, on recourt largement à la *quantité de travail.*

La quantité de travail d'une gamme d'usinage (T_p) lors de la fabrication des pièces est définie comme la somme des temps d'usinage par pièce de toutes les phases:

$$T_p = \sum_{i=1}^{m} T_{ph}, \quad (175)$$

où m est le nombre de phases qui constituent la gamme;

T_{ph}, le temps nécessaire pour l'exécution de chaque phase.

La quantité de travail T_p est l'indice principal définissant les frais de main-d'œuvre directe, mais il ne permet pas d'apprécier les variantes comparées en fonction du travail matérialisé dans les matières d'œuvre et les moyens de production.

L'indice qui définit les gammes en fonction des frais totaux de main-d'œuvre directe et indirecte est le prix de revient de la pièce.

Le prix de revient est constitué par le prix de la matière de la pièce, des salaires des ouvriers occupés directement à la fabrication de la pièce et des frais généraux d'organisation de la fabrication.

On distingue le prix de revient atelier, qui ne tient compte que des frais généraux d'atelier, et le prix de revient usine, qui rend compte également des frais généraux d'usine.

Les frais d'atelier comprennent les assurances, congés payés et autres majorations des traitements de la main-d'œuvre directe de fabrication ; les salaires de la main-d'œuvre assurant la marche de l'équipement (ajusteurs de service, monteurs-électriciens, graisseurs, etc.) ; les frais d'énergie de fabrication (énergie électrique, air comprimé, combustibles et eau prévus pour la fabrication) ; les frais de lubrifiants et de matériaux d'essuyage ; d'amortissement de l'équipement et des appareillages ; d'entretien de l'équipement et de l'appareillage ; d'outils ; les traitements du personnel de l'atelier (ingénieurs, techniciens, comptables, etc.) ; les traitements de la main-d'œuvre indirecte ; les frais de manutention d'atelier ; l'entretien des bâtiments (chauffage, éclairage, eau) ; les majorations pour l'amortissement des bâtiments de l'atelier ; les frais de réparations courantes des bâtiments de l'atelier ; de sécurité ; de recherches et d'études ; de rationalisation, etc.

Les frais généraux usine comprennent: le traitement du personnel de la direction, les charges afférentes aux salaires, les frais de missions commandées, de l'entretien des transports ; les pertes par rebutage en cours de fabrication, les frais d'organisation de la fabrication de nouveaux produits, les impôts sur le chiffre d'affaires et autres frais accessoires.

Pour réaliser une analyse comparative des variantes d'une gamme de fabrication on peut faire appel au prix de revient atelier d'une pièce (P_p) calculé suivant la formule :

$$P_p = M + S + A, \tag{176}$$

où M est le prix de la matière d'œuvre ou de l'ébauche à l'exception du prix de chutes rendues ;
S, le salaire de la main-d'œuvre directe occupée à la fabrication de la pièce considérée ;
A, la somme des frais d'atelier majorés sur le prix de la pièce fabriquée.

Lorsque la pièce est fabriquée directement à partir d'un laminé, le prix de la matière d'œuvre est défini par le poids du laminé considéré multiplié par le prix du laminé.

Si la pièce se fait à partir d'une ébauche (pièce coulée, forgée) livrée par la section d'usinage-ébauche, le prix de la matière d'œuvre est constitué par le prix facturé de l'ébauche $P_{éb}$ calculé suivant une formule analogue

$$P_{éb} = M_{éb} + S_{éb} + A_{éb},$$

où $M_{éb}$ représente les frais de la matière d'œuvre employée pour la fabrication de l'ébauche;

$S_{éb}$, le salaire de la main-d'œuvre directe occupée dans la section d'usinage-ébauche;

$A_{éb}$, les frais de section d'usinage-ébauche majorés sur le prix de chaque ébauche.

En posant M comme le prix de revient de l'ébauche, les autres termes du prix de revient de la pièce ne sont définis qu'en fonction de l'usinage.

Lors de l'usinage d'une pièce, le temps d'usinage par pièce T_p et le salaire par unité de temps L varient suivant la qualification nécessaire à l'exécution du travail; c'est pourquoi le salaire qui fait partie du prix de revient de la pièce est constitué par la somme des salaires payés pour chaque opération

$$S = \sum_{i=1}^{m} T_{ph} L,$$

où m est le nombre de phases de la gamme d'usinage.

Il est beaucoup plus difficile d'établir les frais d'atelier rapportés à la pièce fabriquée. La méthode relativement la plus simple est celle du calcul des frais d'atelier proportionnellement au salaire de la main-d'œuvre directe de fabrication; les frais d'atelier (Q) sont alors définis en pour cent par la formule

$$Q = \frac{A_a}{S_a} \cdot 100\ \%,$$

où A_a est la somme des frais d'atelier annuels;

S_a, le fonds annuel des salaires de l'atelier.

Ainsi, lorsque le fonds annuel des salaires est de 1 200 000 roubles et les frais d'atelier annuels de 3 000 000 de roubles, on a

$$Q = \frac{3\,000\,000}{1\,200\,000} \cdot 100 = 250\ \%,$$

c'est-à-dire que la majoration des frais d'atelier est de 2,5 roubles par 1 rouble de salaire.

On a alors

$$P_p = M + S + A = M + S + \frac{S \cdot Q}{100}$$

ou

$$P_p = M + S\left(1 + \frac{Q}{100}\right). \qquad (177)$$

Pourtant lors de l'étude économique des variantes comparées de la gamme d'usinage, cette méthode de calcul des frais d'atelier peut fausser les conclusions, car elle n'indique pas la part réelle des frais d'atelier qui revient à chaque pièce dans les diverses variantes du travail de l'ébauche.

On a tenté de résoudre ce problème en faisant les calculs par la méthode de la machine-heure; elle consiste à définir pour chaque machine ou chaque groupe de machines analogues les frais d'atelier qui correspondent au fonctionnement de la machine pendant une heure; on s'est efforcé de ne rapporter à la machine considérée que la partie des frais d'atelier intervenant pour assurer sa marche, sans tenir compte du salaire de l'ouvrier. Mais cette méthode n'a pas été beaucoup appliquée; il est très difficile d'établir le prix de la marche d'une machine pendant une heure, cette recherche impliquant une étude approfondie de tous les aspects du travail d'un atelier pendant une période importante.

Pour confronter les variantes des gammes d'usinage, on se borne généralement à réaliser des calculs plus ou moins approchés en localisant les frais d'atelier, c'est-à-dire en les associant à des postes de travail ou des machines définis, chargés de l'exécution des gammes confrontées; la répartition des frais d'atelier est alors précisée seulement pour ces machines. La localisation n'est effectuée que pour les termes des frais d'atelier qui peuvent enregistrer des écarts importants d'une variante à l'autre; en ce qui concerne les autres termes, on considère, avec restriction, certes, qu'ils se répartissent d'une manière uniforme quelle que soit la variante de la gamme d'usinage.

En adoptant la méthode de localisation, définissons les frais d'atelier pour chaque phase de la gamme d'usinage :

$$A = Am_m + A_m + El + Mn + Out + Aa,$$

où A est la somme des frais d'atelier associés à l'exécution de la phase;

Am_m, l'amortissement de la machine utilisée;

A_m, les frais d'entretien courant de la machine rapportés à la phase exécutée;

El, les frais d'énergie électrique rapportés à la phase;

Mn, les frais relatifs au montage utilisé;

Out, les frais relatifs aux outils employés pour l'exécution de la phase ;
A_a, les autres frais d'atelier qui ne dépendent pas de la variante d'usinage.

Les normes moyennes d'amortissement de l'équipement sont établies pour chaque branche industrielle. En construction mécanique pour les machines-outils ces normes sont égales à 10 % du prix de livraison de la machine compte tenu des prix d'emballage, de transport et du montage qu'on estime être de 10 à 15 % du prix de livraison. La somme totale des frais relatifs à la machine tient ordinairement compte de ces dépenses.

Dans les conditions d'une fabrication continue (de masse), lorsque les machines n'exécutent qu'une seule opération, l'amortissement rapporté à une opération est calculé d'après la formule

$$Am_m = \frac{0,1 S_m 100}{N} = \frac{10 S_m}{N} \text{ copecks,}$$

où S_m est la somme initiale des frais de la machine (compte tenu des 10 à 15 % nécessaires pour l'emballage, le transport et le montage), en roubles ;
N, le nombre de pièces fabriquées annuellement sur la machine.

Dans les conditions d'une fabrication sérielle ou unitaire, lorsque plusieurs opérations sont affectées à la machine

$$Am_m = \frac{0,1 S_m \cdot 100 \cdot T_p}{60 \cdot F \eta_c} = \frac{S_m}{6 F \eta_c} \cdot T_p \text{ copecks,}$$

où F est le fonds annuel réel du temps de travail de l'équipement par heure ;
η_c, le coefficient de charge de la machine ;
T_p, le temps d'usinage par pièce, en mn.

Les frais annuels d'entretien courant, de révisions et de vérifications de la machine peuvent être établis en fonction de la complexité des travaux à réaliser en utilisant les références des réparations prophylactiques prévues par le plan ; dans ces conditions, on a pour une fabrication continue (de masse) :

$$A_m = \frac{F_m}{N} \text{ roubles,}$$

où F_m sont les frais annuels prévus pour les réparations, les révisions et les vérifications de la machine ;
N, le nombre de pièces fabriquées par an ; pour une fabrication sérielle et unitaire

$$A_m = \frac{F_m}{60 F \eta_c} T_p \text{ roubles.}$$

Les frais d'énergie électrique rapportés à une opération constituent

$$El = \frac{N_i C_c F_{él}}{60} \cdot T_m \text{ copecks,}$$

où N_i est la puissance installée des moteurs de la machine en kW;
C_c, le coefficient de charge des moteurs électriques de la machine; ($C_c = 0{,}5$ à $0{,}9$, suivant les régimes de coupe);
$F_{él}$, les frais par 1 kW·h d'énergie électrique recueillie sur les tableaux de distribution de la sous-station de l'atelier, en copecks ($F_{él} = 20$ copecks);
T_m, temps machine en mn.

Pour $C_c = 0{,}75$, on obtient $El = 0{,}25\ N_i T_m$.

Les frais relatifs à l'application des montages spéciaux sont définis par le délai de leur amortissement qui peut varier de 2 à 4 ans en fonction des modifications éventuelles de la construction de la pièce usinée. Les frais d'entretien annuels des montages constituent environ de 10 à 25 % de leur prix; ainsi pour un délai d'amortissement de deux ans et pour 17,5 % de frais d'entretien annuels, on a

$$Mn_2 = \frac{0{,}5P_{mn} + 0{,}175P_{mn}}{N} \approx \frac{0{,}68P_{mn}}{N},$$

où P_{mn} est le prix du montage; N, le nombre de pièces fabriquées par an.

Pour des délais d'amortissement de trois et de quatre ans, on obtient respectivement

$$Mn_3 = \frac{0{,}51P_{mn}}{N}$$

et

$$Mn_4 = \frac{0{,}43P_{mn}}{N}.$$

Dans une production sérielle, on peut admettre que les frais d'entretien annuels des montages s'élèvent à 10% de leur prix, donc

$$Mn_2 = \frac{0{,}6P_{mn}}{N}; \quad Mn_3 = \frac{0{,}43P_{mn}}{N}; \quad Mn_4 = \frac{0{,}35P_{mn}}{N}.$$

Les renseignements les plus sûrs sur les prix de fabrication des montages peuvent être obtenus dans la section d'outillage, la compétence de son personnel dans ce domaine étant généralement suffisante. Il existe également des recueils de prix des montages de divers types.

Les frais d'outillage par opération peuvent être établis en partant des considérations suivantes. Le prix de l'affûtage d'un outil W_0 est calculé d'après la formule

$$W_0 = t_w S_w \left(1 + \frac{F_w}{100}\right) + \frac{P_0 h}{H},$$

où t_w est le temps d'affûtage de l'outil, en mn ;
S_w, le salaire pour l'affûtage de l'outil par mn ;
F_w, les frais de la section d'affûtage, en pour cent ;
h, l'épaisseur de la couche enlevée par chaque affûtage, en mm ;
H, l'épaisseur totale de la couche pouvant être enlevée pour l'outil considéré, en mm ;
P_0, le prix de l'outil.

Si l'on divise les frais relatifs à chaque affûtage par le nombre de pièces K_0 usinées par l'outil pour l'exécution de l'opération considérée entre deux affûtages, on obtient les frais d'outillage par opération rapportés à l'ébauche usinée :

$$Out = \frac{W_o}{K_0} .$$

Compte tenu de :

$$K_0 = \frac{T}{T_m} ,$$

où T est la tenue de l'outil en minutes, il vient

$$Out = \frac{t_w s_w \left(1 + \frac{F_w}{100}\right) + \frac{P_0 h}{H}}{T} T_m .$$

Lors de l'usinage par outils multiples, Out est calculé pour chaque outil et l'on porte dans la formule du prix de revient

$$\sum_{i=1}^{m} Out,$$

où m est le nombre d'outils.

Les autres frais d'atelier qui ne dépendent pas de la variante d'usinage sont :

$$A_{autres} = \frac{A_g - A_{am} - A_{en} - A_{él} - A_{out}}{100} \cdot S,$$

où A_g est le pourcentage général des frais d'atelier rapporté au salaire de la main-d'œuvre directe de fabrication ;
A_{am}, le pourcentage des frais d'atelier suivant l'article « Amortissement de l'équipement et de l'appareillage » ;
A_{en}, ibidem suivant l'article « Réparation et entretien de l'équipement et de l'appareillage » ;
$A_{él}$, ibidem suivant l'article « Energie nécessaire pour la fabrication » ;
A_{out}, ibidem suivant l'article « Prix des outillages » ;
S, le salaire d'un ouvrier participant directement à la fabrication et payé aux pièces.

Les renseignements sur la part que constituent les divers articles des frais peuvent être fournis par la comptabilité de l'atelier.

Il arrive qu'on se borne à faire l'analyse technique et économique des variantes des gammes d'usinage ou à apprécier la rentabilité de ces gammes. Dans ce cas on considère que l'ébauche est la même pour toutes les variantes. Pour étudier des gammes complexes de fabrication des pièces mécaniques, il faut comparer non pas les prix de revient d'usinage, mais les prix de revient des pièces, compte tenu du prix de la pièce brute. Dans ces conditions il ne faut pas oublier qu'un rapport existe entre le mode d'exécution des ébauches et leur usinage ultérieur qui intervient parfois en entraînant des corrections radicales de la gamme d'usinage des ébauches réalisées par des modes d'usinage différents; il faut en tenir compte surtout en faisant appel aux méthodes précises de fonderie, d'estampage, de travail à la presse, d'étirage, etc.

Il est évident que le remplacement des pièces monoblocs par des constructions soudées implique une analyse comparative technique et économique. On établit alors le prix de revient de toutes les pièces faisant partie de la construction soudée, celui du soudage et de l'usinage de la construction soudée, si un tel usinage est prévu. En procédant de la même manière on établit à l'aide de mêmes formules le prix de revient de l'assemblage, excepté, naturellement, les formules relatives à l'affûtage des outils.

En confrontant les prix de revient de diverses gammes d'assemblage, on peut choisir la gamme la plus rentable. En additionnant les prix de revient des opérations élémentaires, on obtient le prix de revient total du montage d'un ensemble ou d'un produit P_{∞}.

Le prix de revient d'une pièce ou d'un ensemble est le critère principal qui définit avec d'autres indices techniques et économiques le choix d'une variante optimale de la gamme de fabrication la plus rentable.

L'objectif d'une analyse comparative technique et économique de différentes gammes de fabrication est de décider, lors de l'établissement des gammes, le choix d'une variante optimale qui, dans les conditions de la fabrication considérées, assure une quantité de travail, des frais de matières et un prix de revient minimaux.

Le perfectionnement des gammes de fabrication, l'élévation de leur niveau technologique se font sur la base d'une analyse technique et économique qui met en évidence les inconvénients de la production et définit les indices caractérisant son accroissement. Mais dans ce domaine, on ne doit pas se borner à l'étude de la gamme de production susceptible d'être appliquée à l'entreprise considérée ; il faut soumettre également à l'étude les gammes dont la mise en œuvre réclame de nouveaux équipements et outillages dont l'exécution demande des

délais importants. Une telle analyse permet d'établir les plans du développement des entreprises.

Notons à titre de conclusion que les gammes de fabrication sont définies par un système d'indices techniques et économiques. En plus des caractéristiques que nous avons déjà examinées, ce sont le volume de production annuelle en roubles par ouvrier participant directement à la fabrication, par unité d'équipement, par 1 m² de la surface de l'entreprise; le volume de la production en nombre de produits (lorsqu'ils sont analogues) ou en tonnes par ouvrier occupé directement dans la fabrication, par 1 m² de la surface de l'entreprise en une journée de travail, par unité d'équipement, etc. Le système des indices techniques et économiques sert à évaluer les projets d'établissement des ateliers, car ces indices définissent la fabrication à l'échelle de l'activité de l'atelier.

CHAPITRE VII

Gammes de fabrication des pièces et des ensembles types

§ 1. Gamme de fabrication des pièces types

Notion de pièces types.

Gammes de fabrication des arbres, des bagues, des pignons, des leviers, des corps; variantes principales de la conception de ces pièces; cahier des charges de leur fabrication; matières d'œuvre; types d'ébauches; problèmes technologiques que pose la fabrication de ces pièces; positionnement des ébauches pour l'usinage; défauts de mise en place et positions relatives; leur mode d'intervention sur les cotes à respecter et les surépaisseurs; gammes d'usinage et équipement utilisé; contrôle des pièces.

A. Généralités

La typisation des gammes de fabrication est très importante pour la modernisation des méthodes de fabrication.

On appelle typisation des gammes de fabrication le procédé d'établissement et d'ordonnancement des gammes qui consiste à les classer en fonction des pièces et de leurs éléments, et à résoudre ensuite tous les problèmes que pose la mise en œuvre des gammes de chaque groupe de la classification.

La typisation des gammes de fabrication est associée à la classification technologique des pièces mécaniques, c'est-à-dire à la répartition de la multiplicité des pièces de la construction mécanique suivant des classes et sur la base des gammes de fabrication analogues.

On appelle classe un ensemble de pièces définies par la communauté des problèmes posés par leur fabrication et résolus en fonction des formes déterminées de ces pièces.

Au sein d'une classe les pièces constituent des groupes, des sous-groupes, etc., en poussant cette division jusqu'au type de pièces, la gamme de fabrication des pièces de même type devant être la même, en principe.

Les pièces mécaniques doivent être classées suivant les branches de la construction mécanique en fonction de celles qu'on y utilise et du caractère spécifique de leur fabrication. Pourtant quelle que soit la multiplicité des pièces mécaniques, il y a des classes de pièces mécaniques communes pour les différentes branches de la construction mécanique; ce sont ce qu'on appelle les pièces types des machines.

L'objet du chapitre ci-dessous est l'étude des problèmes communs à la fabrication des pièces de divers types employées en construction mécanique. La technologie de la fabrication des pièces types est la base de l'étude des gammes de fabrication appliquées dans diverses branches industrielles, ainsi que de l'établissement des gammes de fabrication et de l'étude des pièces mécaniques conformément aux prescriptions imposées par la fabrication.

B. Gamme de fabrication des arbres

Les types fonctionnels principaux des pièces constituant la classe des arbres sont les arbres lisses, à fusées, à flasques, à rebords, à fusées unilatérales, à fusées bilatérales, arbres pleins et creux à trou central lisse ou étagé. Les portées des arbres étagés peuvent comporter des rainures de clavettes, des cannelures ou des filets. Les raccords entre les fusées se font par des dégagements, parfois des congés; lorsque les congés ou les dégagements ne sont pas prévus, il est avantageux de réaliser la fusée avec des outils assurant le dressage de la fusée de grand diamètre (fig. 240) ; la tenue de ces outils est d'environ deux fois inférieure à celle des outils à charioter courants dans les mêmes conditions d'usinage, mais la composante radiale de l'effort de coupe est nettement plus faible; ces outils peuvent donc être largement utilisés, surtout pour l'exécution des pièces peu rigides. Un congé se fait avec un outil dont la fabrication est plus compliquée; c'est pourquoi, lorsque c'est possible, il est plus avantageux de raccorder les fusées par un dégagement. Les faces de l'arbre doivent être chanfreinées. Les arbres dont la longueur ne dépasse pas 12 diamètres ($L \leqslant 12\ D$) sont considérés comme rigides; lorsque $L > 12\ D$, les arbres sont classés parmi les pièces non rigides et pour leur usinage on recourt à des lunettes ou au chariotage à l'outil couteau avec dressage de la fusée (fig. 240).

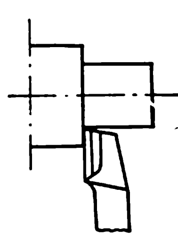


Fig. 240. Exécution d'une portée d'arbre ne comportant pas de congé ou de dégagement

Voici les prescriptions imposées par la fabrication des pièces de la classe des arbres. Les diamètres des portées sont exécutés suivant la 2e ou la 3e classe de précision, et dans certains cas particuliers, suivant la 1re classe.

L'ovalisation et la conicité des arbres cylindriques lisses et des portées cylindriques des arbres à fusées ne doivent pas dépasser les limites imposées par les tolérances sur les cotes diamétrales correspondantes. Le faux-rond des portées par rapport aux fusées d'appui (double excentricité) ne doit pas dépasser 10 à 30 μ. Le défaut de parallélisme des rainures de clavette ou des cannelures par rapport

à l'axe de l'arbre ne doit pas dépasser 0,1 μ/mm (0,1 μ par 1 mm de longueur) ; la tolérance sur la longueur des fusées varie de 50 à 200 μ ; l'état de surface des portées se situe entre la 7e et la 10e classe.

La matière d'œuvre utilisée pour la fabrication des arbres est l'acier au carbone, au manganèse, au chrome, au chrome-nickel, au chrome-nickel-molybdène (pour des arbres très chargés), ainsi que d'autres aciers de construction.

Certaines pièces de cette classe (cylindres de laminoirs, broches de machines-outils) se font en fonte résistante.

Si le mode d'obtention des cotes est automatique, les ébauches des arbres sont fabriquées par estampage. Pour les arbres lisses, la matière d'œuvre essentielle est constituée par des barres d'acier calibrées ; les arbres à fusées dont les cotes diamétrales diffèrent peu se font en acier laminé à chaud ; les ébauches en fonte résistante sont obtenues généralement par coulée centrifuge.

L'utilisation des ébauches coulées pour l'exécution des pièces de la classe des arbres permet de réduire nettement les surépaisseurs et de diminuer la quantité de travail nécessaire pour réaliser l'usinage.

La fabrication des arbres pose certains *problèmes spécifiques*. La flèche des laminés et des pièces forgées qui atteint parfois 5 μ/mm (5 μ par 1 mm de la longueur d'arbre) rend nécessaire le dressage des ébauches pour diminuer les surépaisseurs d'usinage ; le dressage réduit la courbure jusqu'à 1 ou 2 μ/mm. Le défaut de coaxialité des portées des arbres à fusées bruts doit se situer dans les limites de 1/4 de la tolérance sur la cote diamétrale de la plus grande portée. Les défauts de l'ébauche brute diminuent progressivement avec l'exécution de chaque reprise d'usinage ; c'est pourquoi le nombre de reprises pour l'exécution de chaque surface élémentaire est défini par les défauts de positions relatives des surfaces d'une ébauche brute et par les prescriptions imposées à la pièce finie.

La reprise terminale sera évidemment celle pour laquelle les défauts de forme et de positions relatives, de même que la tolérance prévue sur les cotes, ne dépasseront pas les limites admises par les prescriptions de fabrication.

Pour parer à la formation d'un faux-rond des portées par rapport aux fusées de tenue, leur façonnage doit s'opérer en une sous-phase. Les arbres creux doivent assurer les spécifications de concentricité des surfaces extérieures par rapport au trou central ; c'est pourquoi au moins la finition des surfaces extérieures doit s'effectuer avec le positionnement suivant le trou usiné.

Pour réaliser un parallélisme maximal des rainures de clavette ou des cannelures par rapport à l'axe de l'arbre, il faut les usiner en serrant l'arbre entre pointes ; le serrage sur des vés ne peut être admis qu'à la condition d'un usinage précis des portées d'appui par rapport à l'axe des centres.

L'observation des tolérances rigoureuses sur la longueur des fusées lors de l'obtention automatique des cotes est assurée par dressage simultané des faces sur une machine réglée à l'avance ; si la tolérance rigoureuse est imposée à la première fusée, on serre l'ébauche par une pointe à ressort.

Positionnement des ébauches lors du façonnage sur des machines-outils. Quel que soit le procédé de mise en place d'un arbre pour l'exécution des surfaces de révolution extérieures (centres pour serrage entre pointes, trou central pour serrage entre pointes champignon, serrage sur mandrin ou sur pince par la surface extérieure), l'élément assurant le positionnement est l'axe de rotation de l'ébauche. C'est ce même axe qui intervient pour assurer le positionnement lors du façonnage sur des machines à fraiser les cannelures et les filets. Pour le défonçage des rainures de clavette, le dressage préalable des faces d'une ébauche brute et l'exécution des centres, on choisit comme surfaces d'appui les surfaces de révolution extérieures par lesquelles l'ébauche repose sur les vés et qui l'orientent dans le sens axial par une des extrémités ou par la face d'une des fusées.

Défauts de mise en place et écarts de positions relatives. Lors du façonnage des surfaces de révolution d'une pièce serrée par les centres entre pointes, le défaut de mise en place n'a pas lieu, car les éléments d'appui et de référence se confondent avec l'axe de rotation. Donc, la tolérance sur la cote à respecter est calculée suivant la formule (73).

Mais l'exécution des centres d'une ébauche est susceptible de provoquer un défaut dû au déplacement de l'axe des centres par rapport à l'axe géométrique de l'ébauche et défini par la formule (139). La totalisation du défaut de centrage avec d'autres défauts de positions relatives se fait d'après la règle du rectangle.

Lors de l'établissement de la surépaisseur d'usinage des surfaces de révolution extérieures il faut tenir compte de la valeur globale des défauts de positions relatives. Le calcul de ces surépaisseurs s'effectue suivant la formule (135) en éliminant le défaut de la mise en place :

$$2z_{b_{\min}} = 2\,[(H_a + T_a) + \rho_a].$$

Lors de l'usinage entre pointes rigides, le défaut de mise en place dans le sens axial (suivant la longueur des fusées) est défini par la formule (7). Lors du façonnage sur des machines réglées à l'avance, l'enfoncement des pointes modifie la tolérance sur la cote à réaliser de la fusée définie par l'élément de référence, ainsi que la surépaisseur d'usinage suivant la longueur de la fusée ; dans ce cas, le calcul de la tolérance sur la cote se fait suivant la formule (71), et celui de la surépaisseur suivant la formule (133).

Lors de l'usinage simultané d'autres fusées, l'enfoncement des pointes ne compromet pas les cotes imposées suivant la longueur des fusées. Les tolérances sur ces cotes sont donc calculées suivant

la formule (73). Mais en calculant les surépaisseurs de dressage simultané des fusées, il faut tenir compte de l'enfoncement des pointes et calculer la surépaisseur d'après la formule (134).

Lors du serrage par une pointe à ressort, l'enfoncement des pointes n'exerce aucune action sur les cotes à respecter suivant la longueur des fusées et sur la tolérance de la fusée associée à la face d'appui se trouvant près de la poupée ; la tolérance est donc calculée d'après la formule (72) ; si l'élément de référence pour l'exécution de la fusée n'est pas la face mais un autre élément de l'ébauche, le défaut de mise en place est défini par la tolérance sur la cote qui associe la face à l'élément de référence ; la tolérance sur la cote est alors calculée suivant la formule (71), c'est-à-dire compte tenu du défaut de mise en place.

Le positionnement suivant un trou central avec serrage entre pointes champignon ne se distingue pas en principe du serrage entre pointes, car l'excentricité de la surface extérieure par rapport au trou est analogue au déplacement de l'axe de centrage par rapport à l'axe géométrique de l'ébauche.

Le positionnement de l'ébauche suivant une surface de révolution extérieure avec serrage sur un mandrin ou une pince peut produire un défaut de mise en place dû au déplacement de l'axe de l'ébauche dans le sens radial par rapport à l'axe de révolution, ainsi qu'au déplacement de l'ébauche le long de l'axe. Pourtant, dans ce cas-là non plus le défaut de mise en place n'agit pas directement sur la tolérance sur les cotes diamétrales à respecter, car l'usinage et le mesurage de la surface exécutée se font par rapport à l'axe de révolution. Par ailleurs, il faut tenir compte du défaut de mise en place lors du calcul de la surépaisseur d'usinage, sinon elle sera insuffisante dans le sens opposé au déplacement. C'est pourquoi la tolérance sur la cote est calculée suivant la formule (73), alors que la surépaisseur, suivant la formule (135).

La tolérance sur la cote de la face associée à l'élément de référence est donnée par la formule (71), et les tolérances sur les cotes des faces dressées simultanément, par la formule (73).

La surépaisseur d'usinage de la face associée à l'élément de référence se calcule suivant la formule (133), alors que celle relative à l'usinage simultané des faces sur une machine réglée à l'avance, suivant la formule (134).

Gammes d'usinage des arbres et équipement utilisé. La gamme d'usinage ainsi que le choix de l'équipement dépendent surtout de la forme, des dimensions et de la rigidité des pièces, ainsi que de leur nombre imposé par le programme. Compte tenu du fait que les arbres à épaulements, à flasques et à rebords sont façonnés d'une manière analogue à celle des arbres à fusées, nous nous bornerons à étudier la gamme d'usinage des arbres lisses et des arbres à fusées.

Les *arbres lisses* sont fabriqués généralement à partir de l'acier calibré de classe de précision 3e, 3a ou 4e, en imposant essentiellement les routages suivants à la fabrication.

1. Mise à longueur de l'ébauche et chanfreinage des bouts soit sur des machines automatiques à tronçonner multi- ou monobroches, soit sur des tours à tronçonner, en fonction du programme imposé.
2. Rectification préalable des ébauches sur des machines à rectifier sans centre.
3. Défonçage des rainures pour clavettes prisonnières sur des fraiseuses à rainurer, des rainures pour clavettes à talon sur des fraiseuses horizontales; exécution des rainures pour clavettes disques sur des machines d'opération ou sur des fraiseuses avec appareillage spécial.

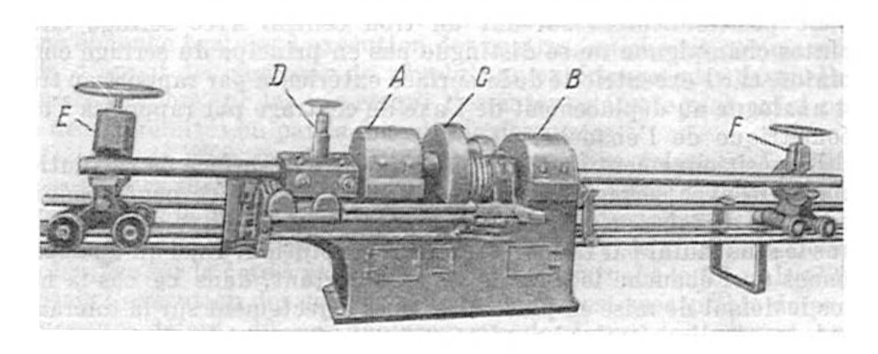


Fig. 241. Machine à tourner sans pointes:
A et *B* — protecteurs des porte-outils; *C* — protecteur du pignon; *D* — support à rouleaux à ressort avant (le support arrière se trouve derrière le protecteur *B*); *E* et *F* — chariots de support de l'arbre.

4. Perçage des trous transversaux, s'ils sont prévus par la construction, sur des perceuses multi- ou monobroches suivant le nombre de trous et le programme imposé.
5. Traitement thermique ou thermochimique (s'ils sont prévus).
6. Rectification de finition après traitement thermique sur des machines à rectifier sans centre; la surépaisseur de rectification de finition est calculée suivant la formule, en fonction des déformations résultant du traitement thermique

$$2z_{b_{\min}} = 2(H_a + \rho_a).$$

Le façonnage des arbres lisses longs en acier laminé à chaud se fait par chariotage préalable (fig. 241) sur des machines à tourner sans pointes; puis, on les rectifie sur des rectifieuses sans centre ou on les soumet au galetage sur des machines à dresser et à polir comportant une tête à polir (fig. 242); ces mêmes machines, mais sans tête

à polir, servent pour dresser des bârres brutes avant leur tournage. Le dressage de longues barres et d'arbres tournés peut se faire également sur des presses à dresser spéciales.

Les *arbres à fusées* sont généralement exécutés à partir des ébauches estampées et, parfois, moulées.

Lorsque la différence entre les diamètres des fusées est faible, l'ébauche est prise dans une barre. Le critère qui détermine l'avan-

Fig. 242. Machine à dresser et à polir les arbres

tage de l'utilisation d'une ébauche estampée est la différence entre les coefficients d'utilisation du métal dans les deux cas. Cet avantage est défini par l'inégalité suivante

$$\frac{g\,(G^{*}-G')}{G'G''} > 0{,}05,$$

où g est le poids de la pièce finie ;

G' et G'', le poids initial respectif du métal prévu pour une ébauche estampée et celui pris dans une barre.

D'une manière analogue on établit qu'il est avantageux d'utiliser une ébauche obtenue par forgeage libre si

$$\frac{g\,(G^{*}-G')}{G'Gm} > \mathbf{0{,}1},$$

où G' est le poids de la matière d'œuvre de l'ébauche forgée.

Lorsque la disposition des fusées est unilatérale et la longueur de l'arbre L ^ 120 mm, l'usinage est effectué sur des tours revolver ou sur des machines automatiques (fig. 243).

Les ébauches des arbres à fusées d'une longueur $L >$ 120 mm, estampées ou débitées à partir d'une barre, sont généralement usinées entre pointes suivant le routage ci-dessous.

1. Fraisage des faces et centrage suivant l'ime des trois variantes: sur une fraiseuse à tambour et sur une machine à centrer à deux têtes (deux phases) ; sur une fraiseuse horizontale et sur une

machine à centrer (deux phases) ; sur une fraiseuse semi-automatique à centrer, modèle 481 ou 4815, en fonction de la longueur de l'ébauche (une phase) ; le choix de la variante est imposé par le volume de la production.

La figure 244 schématise une exécution typique pour la fabrication sérielle de faces d'arbres sur une fraiseuse horizontale avec reprise des ébauches.

Après chaque course de la table, le deuxième indexage fournit un arbre dressé des deux côtés ; l'autre arbre est serré par le deuxième indexage libéré pour réaliser le dressage de la deuxième face, alors que le premier reçoit une nouvelle ébauche pour le dressage de la première face.

Le travail avec retournement des ébauches présente des avantages par rapport à l'exécution

Fig. 243. Façonnage d'une pièce de type arbre sur un tour revolver

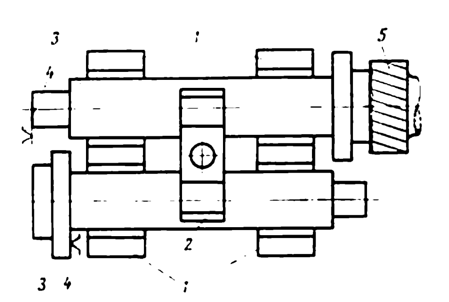


Fig. 244. Schéma du fraisage des faces de deux ébauches sur une fraiseuse horizontale :

1 — vés de mise en place ; 2 — vés de serrage ; 3 — ébauches usinées ; 4 — butées ; 5 — fraise

des lots, lorsqu'on usine d'abord, pour tout le lot, les faces des arbres d'un côté dans un montage à deux indexages, puis toutes les faces de l'autre côté.

Le travail avec retournement élimine l'intervalle dans la fabrication des ébauches commencées d'usinage tout en assurant à la chaîne un fonctionnement continu.

La figure 245 donne un schéma type pour la fabrication en grande série et de masse du dressage des faces (indexage *I*) et du centrage (indexage *II*) d'un arbre.

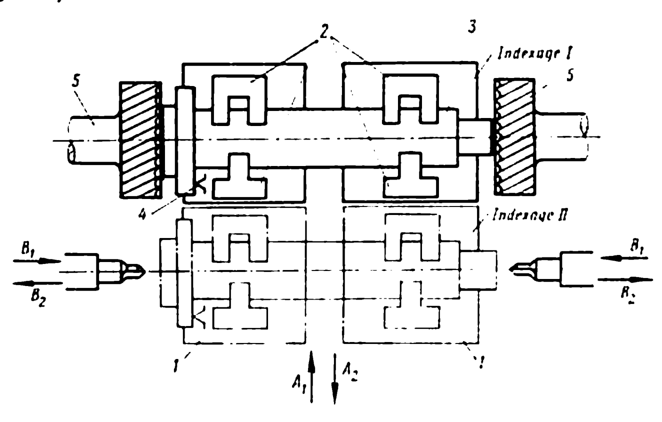


Fig. 245. Représentation schématique du dressage des faces et du centrage sur une machine à fraiser les centres:

1 — chariots; *2* — vés de serrage; *3* — ébauche usinée; *4* — butée; *5* — fraises; les flèches *A* et *B* indiquent le mouvement successif des chariots et des têtes à centrer; le pointillé (ind. *II*) matérialise la position terminale de l'ébauche lors de l'exécution des centres

La mise en place pour le fraisage des faces et le centrage se font sur des vés avec blocage de l'ébauche dans le sens longitudinal par un épaulement de tenue ou une face de fusée suivant une butée spécialement établie.

Les centres peuvent comporter ou ne pas comporter un cône de protection (fig. 246). Les centres avec cône ont l'avantage de protéger le cône d'appui du centre contre les chocs, assurant ainsi une mise en place plus précise.

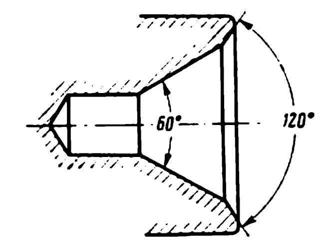


Fig. 246. Centre avec cône de protection

2. Tournage de dégrossissage et de finition des ébauches d'arbres sur des tours monobroches semi-automatiques à outils multiples (fig. 247); sur des tours multibroches verticaux semi-automatiques (fig. 248); sur des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques (fig. 249); sur des tours comportant des reproducteurs hydrauliques; sur des tours universels courants.

La mise en œuvre des tours semi-automatiques verticaux mono- ou multibroches à outils multiples est caractéristique de la fabrication en série ou de la fabrication de masse; l'usinage sur des tours courants dotés d'un reproducteur hydraulique est propre à la fabri-

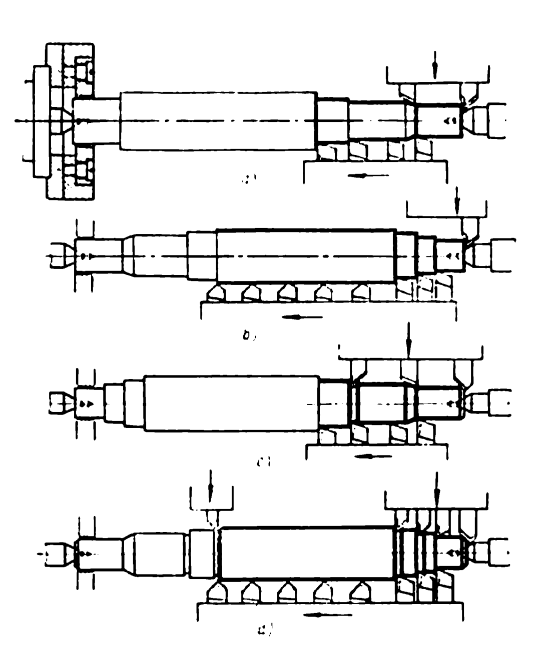


Fig. 247. Tournage d'une ébauche sur un tour semi-automatique à outils multiples :

a — dégrossissage d'un bout ; *b* — dégrossissage de l'autre bout ; *c* et *d* — finition des bouts dans le même ordre

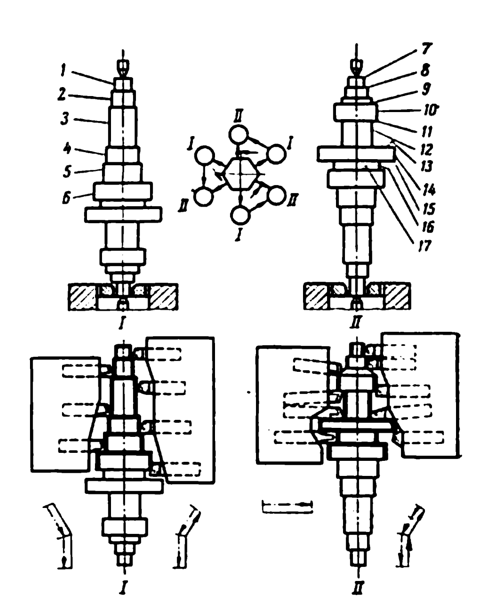


Fig. 248. Usinage d'une ébauche d'arbre sur une machine multibroche verticale semi-automatique :

1-17 — surfaces façonnées par dégrossissage et finition

cation en petite série ; l'application des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques est avantageuse dans la fabrication de masse, ainsi qu'en série courante.

Le choix d'une variante d'exécution de la phase principale d'usinage d'un arbre (son tournage) est un problème ardu; le plus difficile est de choisir entre un tour semi-automatique horizontal monobroche à outils multiples et une machine à recopier hydraulique semi-automatique.

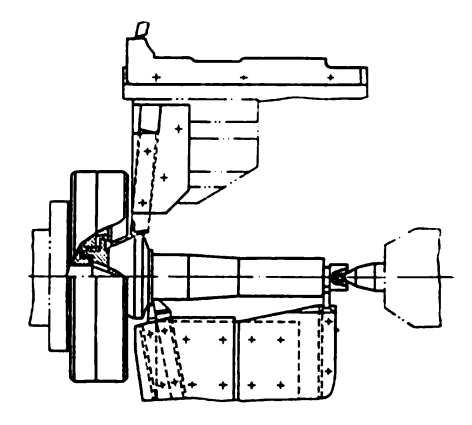


Fig. 249. Exécution d'une ébauche de pignon menant sur une machine à recopier hydraulique semi-automatique

La précision du tournage par outils multiples est altérée par plusieurs facteurs secondaires dont le défaut de position relative de plusieurs outils ; l'usure irrégulière des outils, dont le travail se fait dans des conditions différentes ; les refoulements alternatifs dans le système élastique machine-pièce-outil par suite de l'engagement successif des outils.

Le façonnage sur des tours semi-automatiques monobroches à outils multiples permet d'obtenir par tournage préalable la 4e ou la 5e classe de précision. alors que la finition donne la 4e classe ; les cotes dans le sens de la longueur sont également respectées suivant la 4e ou la 5e classe de précision. La précision de l'exécution des cotes diamétrales peut être poussée jusqu'à la 3e et même la 2e classe, en utilisant des outils spéciaux de finition, les planes de front.

L'usinage des surfaces sur des tours semi-automatiques verticaux multibroches à outils multiples à attaque successive permet de réaliser en plusieurs reprises la 2e ou la 3e classe de précision ; l'usinage sur des tours semi-automatiques à cycle continu permet d'obtenir sur un chariot en une reprise prévue pour chaque surface la 4e classe de précision.

En ce qui concerne le temps machine, toutes les variantes du tournage par outils multiples sont plus avantageuses que le tournage par outil unique. Le temps machine est minimal lorsque l'ordonnancement des phases de tournage par outils multiples s'effectue suivant la méthode de la division de la longueur d'usinage. Dans ce cas, chacune des portées de l'arbre est exécutée en une passe, et la durée du temps principal est définie suivant l'outil chargé de façonner le plus long secteur.

Lorsque l'ébauche d'un arbre à fusées est prise dans un laminé, les phases sont établies suivant la méthode de la division des surépaisseurs, car le secteur de diamètre inférieur au précédent ne permet pas à l'outil d'enlever toute la surépaisseur en une passe et les outils qui le précèdent passent par plusieurs secteurs adjacents; le temps machine est défini par la longueur globale de ces secteurs.

Eu égard au temps d'usinage par pièce, le tournage par outils multiples n'est pas toujours plus avantageux que celui sur une machine à recopier hydraulique semi-automatique. Cela s'explique par les frais importants de temps de préparation et le temps de la desserte technique lors du travail des machines à outils multiples. L'expérience montre que ces frais ne sont supportables que lorsque le nombre d'outils est six ou sept, pouvant aller jusqu'à dix à la limite.

Le nombre d'outils est d'autre part limité par la rigidité des ébauches usinées, la puissance de la machine et la construction compliquée des porte-outils. Tous ces facteurs rendent difficile l'utilisation des machines semi-automatiques à outils multiples dans la fabrication de masse et interdisent leur utilisation dans la fabrication en série. Le travail sur des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques présente plusieurs avantages quant au tournage par outils multiples.

La diminution du nombre d'outils à régler, le réglage cinématique plus simple et la mise à la cote aisée du reproducteur réduisent de 2 à 3 fois le temps de réglage et de la mise à la cote du reproducteur en cours de travail sur des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques par rapport aux machines à outils multiples, la durée d'un réglage d'une complexité moyenne étant ainsi réduite à 30 ou 35 minutes.

Pour la fabrication des lots relativement petits sur une machine à recopier hydraulique semi-automatique ce gain de temps dans le réglage rend l'usinage avantageux. Lors du travail sur des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques, la productivité s'accroît non seulement par suite de la diminution du temps de réglage. mais aussi parce que le travail se fait à des vitesses de coupe plus grandes, la puissance disponible étant mieux utilisée.

La finition par reproduction assure une précision plus élevée (la tolérance réalisée est généralement de 0,05 à 0,06 mm). L'aptitude élevée de réponse de la servocommande permet de réaliser des cotes conformes à celles du reproducteur; le refoulement dans le système élastique est faible par suite du petit nombre d'outils; les écarts de position relative des outils et leur usure irrégulière sont exclus.

Le tournage par reproduction hydraulique est particulièrement avantageux pour l'exécution des arbres d'une construction peu rigide, pour la finition des arbres à fusées longues, lorsqu'il est impossible

d'usiner avec des outils multiples en appliquant la division de la longueur, les spécifications de l'état de surface étant trop rigoureuses.

Les modèles des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques permettent d'usiner des arbres jusqu'à 320 mm de diamètre et d'une longueur atteignant 1250 et même 1600 mm (fabriqués sur commande spéciale).

Tout en utilisant le tournage des arbres sur des machines à recopier hydrauliques semi-automatiques, la fabrication sérielle présente l'avantage de mettre en œuvre leur façonnage sur des tours munis d'un chariot universel à reproduire hydraulique. L'emploi d'un tel chariot permet de réduire le temps secondaire de 3 à 4 fois par rapport aux tours usuels. Ce résultat s'obtient grâce à la diminution du temps de recul et d'approche de l'outil lors de son passage d'une fusée à une autre, et à la diminution du temps nécessaire pour effectuer les mesures des fusées, car lors de la reproduction, la mesure n'est prise que pour une seule fusée, alors que les dimensions des autres sont réalisées automatiquement, conformément au reproducteur. On réussit également à réduire les frais de temps machine, car lors du passage automatique de l'outil d'une fusée à une autre, surtout lorsqu'elles sont courtes, l'opérateur peut lancer la broche à une vitesse plus grande.

Il en résulte que le temps d'usinage par pièce des arbres sur des tours munis d'un chariot à recopier hydraulique est de 2,5 à 3 fois inférieur à celui que nécessite l'usinage sur un tour usuel. Le temps de préparation est si petit que les frais de temps supplémentaires pour le réglage, par rapport au tour, sont justifiés à partir d'un lot de trois à quatre pièces.

Pour la fabrication unitaire des arbres, l'ébauche est prise dans un laminé ou est obtenue par forgeage libre, suivant la forme et les cotes ainsi que la différence entre les diamètres des fusées. Les opérations de tournage sont effectuées par usinage successif des fusées sur des tours usuels. Dans ces conditions, le centrage de gros arbres s'opère d'après le traçage, et leur usinage, avec serrage d'une extrémité sur le mandrin et le montage de l'autre sur une lunette; pour réaliser une telle mise en place, on façonne au préalable une portée à la demande de la lunette, et dans ce but l'arbre bloqué sur le mandrin est encore serré par une contre-pointe. Au lieu d'usiner spécialement une portée à la demande de la lunette, on recourt parfois pour des arbres d'un diamètre allant jusqu'à 200 mm à des manchons réglables, maintenus sur les portées brutes au moyen de vis de centrage, qui servent à la fixation sur les lunettes; le réglage des vis permet d'assurer de plus la coïncidence des axes du manchon et de l'arbre. Les têtes des vis doivent être noyées dans le corps des flasques (fig. 250).

3. Le défonçage des rainures de clavette s'effectue sur des machines à fraiser les rainures avec une fraise en bout ou sur des fraiseuses horizontales avec une fraise disque. L'arbre est monté par ses portées sur des vés dégauchis de façon à assurer le parallélisme avec la direction de l'avance.

Les surfaces cannelées des arbres sont exécutées par une fraise mère sur des machines à fraiser les cannelures, les arbres étant montés entre pointes rigides. L'exécution des cannelures en une passe est avantageuse quant à la productivité lorsque le diamètre des portées varie de 60 à 80 mm; lorsque le diamètre est plus grand, l'opération doit être divisée en dégrossissage et finition. Le façonnage des surfaces cannelées s'effectue en deux opérations, indépendamment de la cote, lorsque l'arbre est soumis à un traitement thermique dont résulte une faible élévation de la dureté ($R_C \approx 40$). Dans ce cas, le défonçage préalable se fait avant le traitement thermique, lorsque le matériau est plus doux; après le traitement thermique, on procède à la finition en corrigeant les écarts de positions relatives éventuels et en obtenant sans rectification les spécifications de précision et d'état de surface imposées.

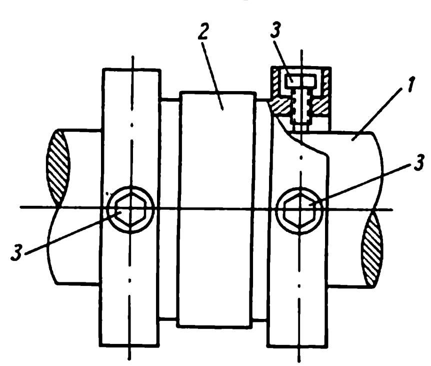


Fig. 250. Manchon réglable pour la mise en place d'une ébauche d'arbre sur une lunette:

1 — arbre; *2* — portée de manchon serrée sur la lunette; *3* — vis de réglage

4. Le perçage des trous est réalisé sur des perceuses. Le type de la machine et le mode de mise en place dépendent de la construction de l'arbre et de la destination des trous.

5. Les filets sont taillés sur des machines à fraiser les filets ou sur des tours à fileter par le procédé tourbillonnaire. Le filetage se fait à des vitesses de coupe élevées (la broche de la tête à fileter faisant de 1000 à 3000 tours par minute) et avec une faible rotation de l'ébauche; on réalise ainsi la 2e classe de précision du filetage et la 6e ou la 7e classe d'état de sa surface, la productivité étant très poussée; en même temps, le mode tourbillonnaire d'exécution du filetage produit un filet couché dû essentiellement aux défauts de mise à la cote des outils et à la cinématique du processus de coupe. Les filets des extrémités des arbres se font sur des machines pour boulonnerie, alors que les arbres courts sont filetés sur des machines à rouler les filets à molettes.

6. Ensuite vient le traitement thermique, après quoi l'arbre est dressé sur une presse.

7. La rectification des portées comporte généralement deux opérations: l'usinage préalable et la finition.

Les arbres sont rectifiés sur des rectifieuses cylindriques avec avance longitudinale (à l'enfilade) ou avec avance transversale (en plongée), la pièce étant serrée entre pointes; les arbres à fusées courts et les arbres lisses sont rectifiés sur des machines à rectifier sans centre.

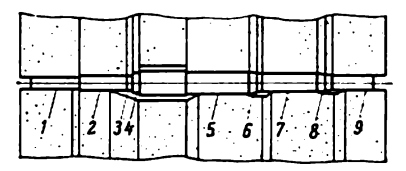


Fig. 251. Schéma de la rectification en plongée d'un arbre à fusées sur une rectifieuse sans centre avec une meule de forme:
1-9 — éléments façonnés de l'arbre

La rectification en plongée se distingue par une productivité élevée, surtout lorsque l'opération est réalisée avec une meule de forme ou un train de meules, plusieurs meules rectifiant simultanément plusieurs portées (fig. 251). Dans la fabrication de masse on emploie des systèmes de huit à dix meules. Il faut tenir compte que lors de la rectification par meules multiples, la précision des cotes diamétrales est dégradée par l'usure irrégulière des meules.

On sait que le temps secondaire est très grand pour la rectification, surtout pour la rectification cylindrique. Pour accroître la productivité, il importe donc de prévoir en cours d'usinage une vérification des cotes pouvant s'effectuer sans arrêter la machine; à cet effet, de nombreux montages prévoient le débranchage automatique de l'avance, une fois la cote à respecter réalisée.

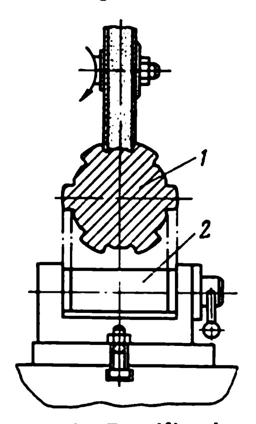


Fig. 252. Rectification des cannelures avec une meule de forme

La précision des portées obtenue par rectification est déterminée par l'état des centres de l'arbre et des pointes de la machine. C'est pourquoi avant de s'attaquer à la finition des arbres non trempés et surtout des arbres ayant subi un traitement thermique, on prévoit souvent une opération de correction qui consiste à rétablir dans les centres à l'aide d'une meule ou d'un rodoir coniques la forme du cône et l'angle de conicité correct.

8. La rectification des cannelures avec une meule de forme ou un train de meules se fait sur une machine à rectifier les cannelures. L'arbre *1* (fig. 252) est serré entre pointes rigides; pour assurer le dégauchissage de l'arbre suivant la position angulaire on utilise un calibre de position *2*.

9. La rectification des filets est une opération plutôt rare, car elle est très compliquée et demande une quantité de travail importan-

te; les spécifications de précision des filets doivent être donc observées par leur exécution.

Les *arbres à trou central*. Les ébauches estampées prévues pour les arbres à trou central sont pleines; le trou central dans de tels arbres est exécuté par forage profond qu'on réalise après le dégrossissage entre pointes des surfaces de révolution extérieures et le façonnage des portées pour le serrage sur un mandrin et la pose sur une lunette. Les trous d'une longueur ne dépassant pas cinq diamètres ($l \leqslant 5\ d$) sont pratiqués avec des forets hélicoïdaux; les trous d'une longueur $l > 5\ d$ se font aux forets à fusil, forets à un ou à deux tranchants,

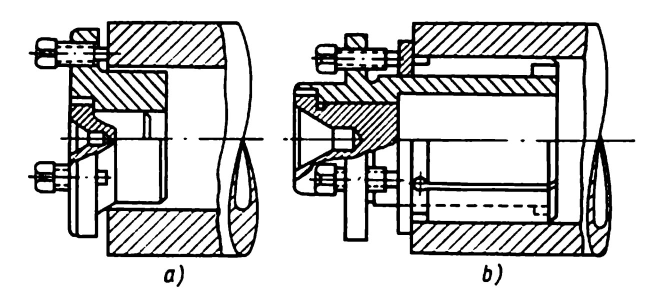


Fig. 253. Bouchons:
a — pleins; *b* — extensibles

suivant le diamètre du trou. Pour les trous d'un grand diamètre ($d > 100$ mm) on utilise des forets pour trépanage; souvent, il est plus avantageux d'employer des forets trépans même pour l'exécution des trous de diamètres quelque peu inférieurs à 100 mm et d'utiliser le noyau ainsi obtenu pour la fabrication d'autres pièces. Le forage ainsi que l'usinage ultérieur du trou central se font généralement sur des machines à forer des trous longs. La finition du trou central s'opère avec des forets-aléseurs et des alésoirs ou avec des outils d'alésage suivant les spécifications imposées et le diamètre du trou. L'usinage ultérieur des surfaces extérieures s'effectue avec le positionnement suivant le trou; à cet effet on emploie des bouchons (fig. 253) ou des croisillons comportant des centres. Pour obtenir une précision maximale de la concentricité des surfaces extérieures par rapport au trou, il est recommandé de réaliser les opérations ultérieures sans changer les bouchons ou les mandrins.

Les ébauches venues brutes de fonderie se font généralement avec des trous requis. Dans ce cas-là aussi il est avantageux de dégrossir d'abord les surfaces extérieures et de façonner les portées pour le serrage sur le mandrin et la pose sur la lunette; le trou brut est alors

choisi comme surface d'appui ; l'usinage se fait essentiellement entre pointes champignon ; ensuite on procède au dégrossissage et à la finition du trou avec la mise en place de la pièce sur le mandrin et la lunette. L'usinage ultérieur de l'ébauche ne se distingue en rien de celui qui a été exposé plus haut. L'exécution des trous étagés présente certaines difficultés; dans ce cas on emploie des mandrins d'alésage (pour $l \leqslant 5\ d$) ou des barres d'alésage (pour $l > 5\ d$), avec un jeu d'outils pour l'exécution simultanée des étages d'un trou. Les trous finis servent d'éléments d'appui pour la rectification des surfaces extérieures.

Les *arbres lourds*. On range par convention dans cette catégorie des arbres d'un diamètre supérieur à 200 mm et d'un poids plus grand que 1 t. Les variétés des arbres lourds et les prescriptions imposées par leur fabrication sont les mêmes que celles des arbres usuels; on peut noter seulement que dans la plupart des cas les arbres lourds comportent des trous centraux dont l'objectif principal est a) de diminuer le poids (un trou central d'un diamètre égal à la moitié du diamètre extérieur permet de diminuer le poids de 25 %, alors que le moment de résistance ne diminue que de 6 à 7 %) ; b) d'assurer l'amenée du lubrifiant ; c) de permettre le prélèvement des éprouvettes en vue de l'étude de la qualité de la matière d'œuvre, ce qui est d'une importance capitale pour les arbres lourds.

Les problèmes de fabrication que posent les arbres lourds ne se distinguent pas de ceux qu'il faut résoudre dans le cas des arbres usuels; il faut pourtant noter les difficultés suscitées par les diamètres importants des flasques, des rebords de centrage et la grande longueur des arbres. Ainsi le faux-rond des faces des flasques ne doit pas être plus grand que 0,03 à 0,05 μ par 1 mm de rayon ; pour les rebords de centrage il faut observer les spécifications de concentricité avec les portées ; le défaut de concentricité admissible va jusqu'à 30 μ ; la courbure de l'axe de l'arbre ne doit pas excéder les limites de 5 à 10 μ par 1 m de longueur.

Les ébauches d'arbres lourds sont obtenues par forgeage libre surtout à la presse et plus rarement au marteau-pilon ; dans la plupart des cas l'ébauche est prise dans un lingot. Après le forgeage, les ébauches brutes subissent généralement un recuit de stabilisation susceptible d'éliminer les contraintes internes et de permettre la normalisation. Pour prévenir la formation des criques dues à un échauffement rapide et à une différence de températures importante inévitable entre les couches périphériques et le centre, la vitesse d'échauffement ne doit pas dépasser 75° par heure; tous les 200 à 300° l'arbre doit être maintenu pendant 8 à 10 h à température constante. Pendant 20 à 30 h, l'ébauche reste dans le four à la température du recuit, puis elle se refroidit lentement avec le four. Le cycle de recuit des arbres lourds dure de 70 à 100 h. La normali-

sation a pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques du métal, son ordonnancement étant analogue à celui du recuit.

Après le traitement thermique on affranchit les parties des extrémités de l'ébauche spécialement prévues pour le prélèvement d'éprouvettes en vue des essais mécaniques.

La gamme d'usinage des arbres lourds est définie par les particularités suivantes. Au départ, on effectue le traçage dont le but est de vérifier la validité de l'ébauche, de réaliser des traits pour le

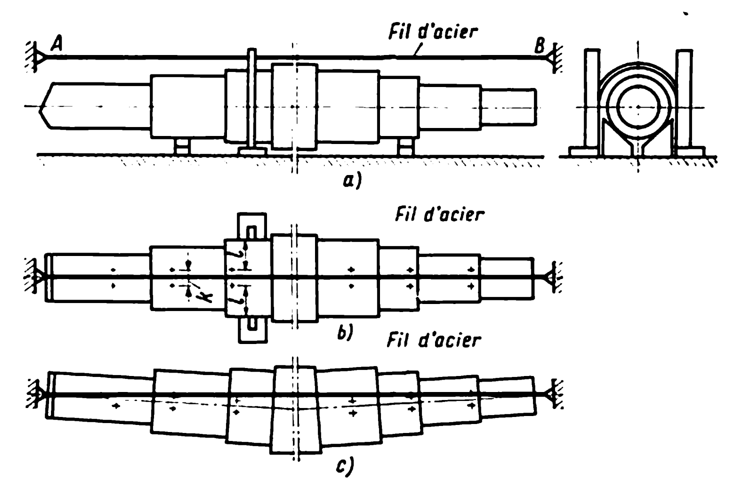


Fig. 254. Traçage d'un arbre lourd:
a — mise en place de l'arbre pour le traçage ; *b* — arbre bon pour l'usinage ; *c* — arbre devant subir le dressage

perçage des centres aux points des faces les plus adaptés, ainsi que d'assurer le dégauchissage de l'ébauche lors de sa mise en place sur la machine. Le traçage de gros arbres se fait sur un dallage encastré dans le sol de l'atelier, ou sur un marbre de traçage dans le cas où l'encombrement de l'ébauche le permet. L'ébauche est posée sur des vés réglables (fig. 254) pour réaliser la vérification approximative de sa planéité ; sa partie supérieure et une des parties latérales sont colorées à la craie ; ensuite on applique successivement sur chacun des deux côtés de la fusée une équerre à partir de laquelle, sur la partie supérieure de l'ébauche, on porte les cotes l ; alors

$$l = R + z_{fin},$$

où R est la moitié du diamètre de l'arbre donné par le dessin ;
z_{fin}, la surépaisseur par côté prévue pour la finition de l'arbre.

La cote k entre les points marqués au pointeau et se trouvant dans la section considérée définit la surépaisseur de dégrossissage restante.

En reliant les milieux des distances k, on trouve la position réelle de l'axe de l'ébauche. Pour obtenir un axe rectiligne on tend un fil d'acier AB qui doit passer entre les points terminaux de la cote k dans toutes les sections; l'ébauche est alors bonne pour l'usinage. Si l'axe de l'ébauche défini par le fil d'acier tendu sort des limites établies par les points terminaux de la cote k, la qualité d'usinage se trouve dégradée et l'ébauche doit subir un dressage à chaud après quoi il faut reprendre le traçage. La position du fil est confirmée par des coups de pointeau sur la face devant recevoir le centrage. On porte sur cette face un trait vertical confirmé à coups de pointeau. Ensuite on tourne l'arbre de 90°, refait le traçage et confirme

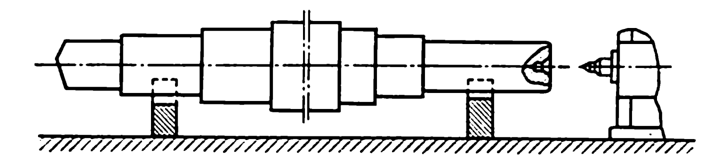


Fig. 255. Centrage d'un arbre sur une perceuse horizontale portative

la position du fil sur la face sur laquelle on porte un deuxième trait vertical qui coupe le premier trait; le point d'intersection est pointé pour le centrage. Lors du traçage des arbres très gros, les équerres sont remplacées par des aplombs. Généralement on n'exécute le centrage qu'à une extrémité de l'ébauche, l'autre étant serrée sur les mors du plateau.

L'exécution du centrage se fait sur une perceuse horizontale portative (fig. 255). L'angle du cône d'un centre pour un arbre lourd est choisi entre 75 et 90°, à cause d'une meilleure résistance.

Le tournage de l'ébauche est réalisé en plusieurs sous-phases. La première sous-phase s'effectue avec serrage de l'extrémité de l'ébauche entre les mors d'un plateau ou d'un mandrin, l'autre extrémité étant centrée et bloquée par la contre-pointe; l'ébauche est alors dégauchie au trusquin suivant les lignes de traçage portées sur sa surface extérieure; cette mise en place est utilisée pour l'exécution des portées prévues pour les lunettes; la distance entre ces portées ne doit pas dépasser 12 D.

Pour l'ébauchage et l'usinage ultérieur l'arbre est serré par les mors d'un plateau ou d'un mandrin et posé sur des lunettes. Pour usiner l'extrémité serrée par les mors, on retourne l'ébauche de façon que son extrémité usinée soit serrée par les mors et l'autre extrémité soit posée sur des lunettes. Lors du dégrossissage on fait des entailles près des extrémités de l'ébauche en prévoyant la mise à longueur de l'arbre compte tenu de la surépaisseur imposée par

l'usinage ultérieur des faces. Puis on affranchit les bouts à la scie ou à l'outil à saigner.

Chaque nouvelle mise en place est suivie d'une vérification du faux-rond au comparateur (fig. 256); à cet effet on prévoit le plus souvent l'exécution d'épaulements de contrôle spéciaux; la correction du faux-rond se fait par déplacement des mors du mandrin.

Le forage des trous longs dans les arbres creux s'opère après ébauchage des surfaces extérieures, car il faut préparer les surfaces d'appui pour assurer le dégauchissage lors de la mise en place pour le forage.

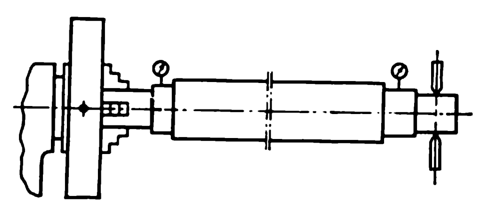


Fig. 256. Vérification au comparateur du faux-rond d'une ébauche d'arbre

Le calcul de la surépaisseur prévue pour l'usinage ultérieur des surfaces extérieures, le positionnement s'effectuant suivant le trou, doit tenir compte de l'écartement éventuel de l'axe du trou long lors du forage.

L'usinage ultérieur des surfaces extérieures avec positionnement sur le trou exécuté se fait en utilisant des croisillons réglables ou soudés comportant des centres et des pointes de la machine. Le dégauchissage se réalise aux deux bouts dans les plans horizontal et vertical; l'ébauche est vérifiée également au faux-rond; la mise en place s'établit avec une précision de 0,5 mm. Lors de la mise en place entre pointes, le dégauchissage ne se fait pas; lorsque l'ébauche est serrée sur un plateau à quatre mors, l'ablocage définitif étant assuré par la contre-pointe, le dégauchissage s'opère du côté du plateau en hauteur pour éliminer le faux-rond; le défaut de mise en place admis est de 0,2 mm. Pour des trous de diamètre inférieur à 400 mm on utilise des mandrins à deux cônes ou des bouchons extensibles.

La finition des portées des arbres exécutées suivant la 2e classe de précision se fait sur des rectifieuses ou les tours à l'aide d'un montage spécial sous forme de chariot. Les surfaces de dureté élevée des arbres trempés fabriqués suivant la 3e classe de précision sont également finies par rectification. Dans certains cas, la finition s'opère avec un outil finisseur plat formant ressort qui assure la 6e ou la 7e classe d'état de surface.

Les outils formant ressort sont utilisés pour parer à un engagement trop fort dans le métal, susceptible d'altérer la surface façonnée. La finition des portées fait également appel au galetage qui améliore la précision et l'état de surface jusqu'à la 7e ou la 8e classe.

Après la finition des portées on procède sur un tour à l'exécution des congés suivie parfois de galetage.

Pour prévenir le fléchissement des arbres lourds sous l'effet de leur propre poids, on emploie, pour leur manutention, une grue et des dispositifs spéciaux de serrage permettant de suspendre l'arbre horizontalement avec dégauchissage au niveau ; dans ces conditions, la distance entre les supports doit interdire le fléchissement de l'arbre pendant le transport et la conservation.

Le *contrôle* implique la vérification des cotes diamétrales et de la longueur des fusées, des cannelures et des filets des portées ; cette vérification se fait avec des calibres, des tampons à limites, des bagues cannelées et des tampons filetés.

Pour vérifier le faux-rond des portées, l'arbre est posé par ses portées d'appui sur des vés ; la touche du comparateur est amenée

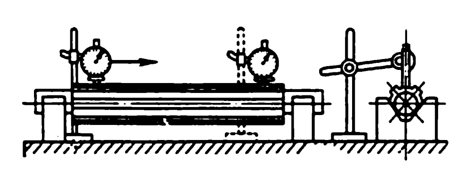
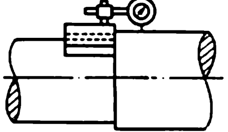


Fig. 257. Schématisation de la vérification du parallélisme entre les cannelures et l'axe et du faux-rond des cannelures par rapport aux portées



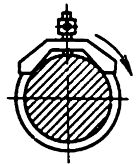


Fig. 258. Dispositif à comparateur pivotant pour vérifier la concentricité des portées voisines d'un arbre

alors en contact avec la portée à vérifier ; la différence entre les lectures maximale et minimale, l'arbre étant tourné à la main, définit la valeur du faux-rond ou, en d'autres termes, la double excentricité. On utilise également des dispositifs à plusieurs comparateurs pour vérifier les cotes diamétrales et les faux-ronds des portées par rapport aux portées d'appui ; dans ce cas, les comparateurs des dispositifs sont réglés suivant un gabarit et bloqués dans une position définie ; les lectures de chaque comparateur définissent les écarts des cotes, alors que la différence des lectures fournies par chaque portée indique la valeur de son faux-rond.

Le parallélisme des cannelures (celui des crêtes, creux et surfaces latérales) par rapport à l'axe des portées est établi par la mesure au comparateur des deux positions extrêmes (fig. 257) ; cette même mise en place peut servir à vérifier le faux-rond des crêtes et des creux des cannelures en mesurant au comparateur les crêtes et les creux diamétralement opposés.

Le contrôle peut s'effectuer également à l'aide d'un matériel automatique.

Le contrôle des arbres lourds est réalisé directement sur les machines. La forme géométrique correcte des portées est vérifiée notamment au comparateur sur le tour ; les cotes diamétrales des portées sont

vérifiées aux calibres mâchoires à touches micrométriques ; la concentricité des portées voisines se vérifie avec un dispositif à comparateur pivotant (fig. 258) ; la vérification de la planéité des flasques se fait par marbrage avec une règle soigneusement grattée. La rectitude de la génératrice d'un cône est vérifiée avec un reglet d'outilleur et à l'aide d'une jauge d'épaisseur. Les portées et les trous coniques s'observent par la méthode des parallèles. Un calibre spécial est appliqué au cône suivant sa génératrice (fig. 259) ; la mesure du

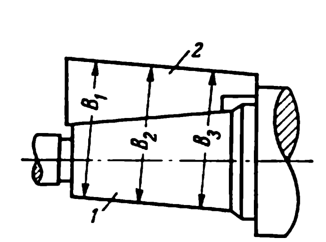


Fig. 259. Vérification d'une portée conique par la méthode des parallèles :
1 — cône à vérifier ; 2 — calibre

Fig. 260. Vérification des trous coniques par la méthode des parallèles :
1 — trou conique ; 2 — calibre

parallélisme de la face supérieure du calibre à la génératrice opposée du cône s'effectue avec un calibre mâchoire micrométrique ou avec un comparateur près des extrémités et au milieu de la portée conique (cotes B_1, B_2 et B_3). La vérification d'un trou conique s'opère de la même façon (fig. 260) ; la surface arrondie du calibre est appliquée à la génératrice du trou, alors que sa surface plane, parallèle à la génératrice opposée, sert à la mesure intérieure par la jauge micrométrique suivant les trois sections (cotes A_1, A_2 et A_3).

C. Gammes d'usinage des bagues

Les types essentiels de bagues sont les bagues lisses (fig. 261,*a*) ; à rebords ou à flasques (fig. 261,*b*) et (261,*c*) ; à trou conique (fig. 261,*d*) ; coniques fendues (fig. 261,*e*) ; à couche régulée d'alliage antifriction (fig. 261,*f*) ; roulées à parois minces à cordon ouvert (fig. 261,*g*) ; les surfaces des bagues sont susceptibles de comporter des rainures pour graissage et des canalisations transversales pour amenée du lubrifiant.

Les prescriptions imposées par la fabrication des bagues sont les suivantes. Pour les cotes diamétrales des surfaces extérieures on impose la 2e ou la 3e classe de précision ; pour les trous, généralement la 2e, et plus rarement, la 3e classe de précision, et la 1re classe

pour des conjugaisons importantes. Le défaut d'épaisseur admissible des parois varie de 0,03 à 0,15 mm. Le voile admissible des faces est de 0,2 mm par 100 mm de rayon; lorsque les faces sont sollicitées par des charges axiales, le voile ne doit pas dépasser les limites comprises entre 0,02 et 0,03 mm. L'état des surfaces de révolution extérieures correspond généralement à la 6e classe; pour les trous, il va de la 6e à la 8e classe, parfois jusqu'à la 9e classe, en fonction des spécifications imposées; les faces sont exécutées suivant la 4e classe, et lorsqu'elles sont sollicitées par des charges axiales, suivant la 6e ou la 7e classe.

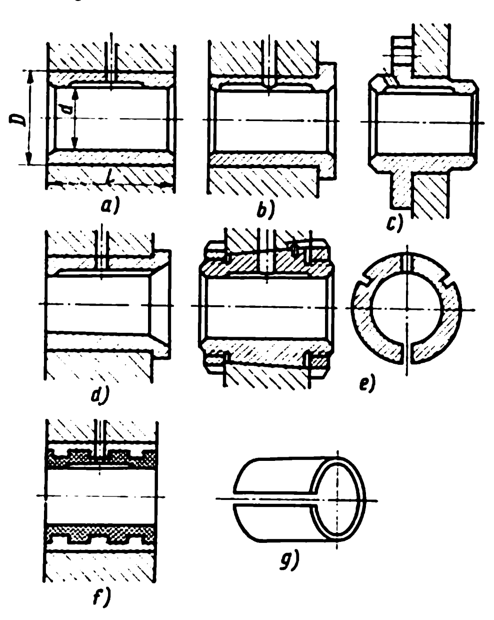


Fig. 261. Variétés de la construction des bagues des paliers

La matière d'œuvre servant à la fabrication des bagues est l'acier, le laiton, le bronze, la fonte, les alliages spéciaux, les cermets ou les matières plastiques.

Les *types d'ébauches*. Les bagues dont le diamètre du trou est inférieur à 20 mm se font à partir de barres calibrées ou laminées à chaud, ainsi que de pièces moulées sous forme de blocs. Pour les bagues dont le diamètre du trou est supérieur à 20 mm, on emploie des tubes étirés sans soudure ou des moulages à trou; le moulage se fait à la machine en sable, en coquilles, par coulée centrifuge et sous pression. Les bagues roulées à parois minces à cordon ouvert sont fabriquées à partir de bandes de bronze ou de laiton; on peut les fabriquer également à partir d'une bande bimétallique. Les ébauches en cermets sont obtenues sous pression et par frittage. Les ébauches en matières plastiques sont obtenues également sous pression. Les ébauches façonnées ou moulées sous pression peuvent être obtenues avec un trou central dont le diamètre n'est pratiquement pas limité, notamment jusqu'à 3 mm et moins suivant l'alliage employé.

Les *problèmes spécifiques posés par la fabrication* consistent à assurer la concentricité des surfaces extérieures par rapport au trou et la perpendicularité des faces par rapport à l'axe du trou. Un problème supplémentaire apparaît pour les bagues à parois min-

ces, celui d'un ablocage de l'ébauche lors de son façonnage sur des machines-outils susceptible d'assurer l'absence de déformations sensibles.

Le problème de la concentricité des surfaces extérieures avec le trou et de la perpendicularité des faces par rapport à l'axe du trou peut avoir trois solutions: 1) l'exécution des surfaces extérieures, du trou et des faces en une sous-phase; 2) le façonnage de toutes les surfaces en deux sous-phases ou en deux phases avec positionnement lors de la finition du trou suivant la surface extérieure; 3) l'usinage de toutes les surfaces en deux sous-phases ou en deux phases avec le positionnement lors de la finition de la surface extérieure suivant le trou.

L'usinage en une sous-phase est possible pour la fabrication des bagues à partir d'une barre ou d'un tube avec tronçonnage de l'ébauche finie à la fin de l'opération exécutée; pourtant dans le cas de spécifications de concentricité rigoureuses, l'écartement éventuel de l'axe du trou lors du perçage implique une finition des surfaces extérieures et des faces, le positionnement s'effectuant suivant le trou.

Lors de l'obtention de grosses ébauches unitaires par moulage, leur façonnage en une sous-phase exige la présence des bossages, ce qui accroît nettement les chutes et réduit le coefficient d'utilisation du métal. Aussi ce procédé n'est-il applicable qu'à la fabrication unitaire; mais là non plus il ne présente aucun avantage par rapport aux autres procédés pour résoudre le problème de la concentricité des surfaces extérieures par rapport au trou et de la perpendicularité des faces par rapport à l'axe du trou.

Parmi les deux autres procédés permettant d'assurer la concentricité, le positionnement effectué en dernière phase de la gamme de fabrication suivant le trou usiné présente plusieurs avantages par rapport au positionnement suivant la surface extérieure façonnée: a) lors de l'usinage sur un mandrin extensible le défaut de mise en place n'a pas lieu (serrage du mandrin entre pointes) ou est très inférieur (serrage du mandrin sur un plateau) comparativement à l'usinage sur un plateau, l'ébauche étant bloquée par sa surface extérieure; b) lors du positionnement suivant le trou, les défauts de positions relatives résiduels, dus à l'écartement de l'axe au cours du perçage, sont éliminés pendant l'usinage des surfaces extérieures et des faces, alors qu'ils existent généralement lorsque l'usinage du trou s'effectue avec positionnement suivant la surface extérieure.

Le *positionnement des ébauches*: a) lors de l'usinage en une sous-phase de l'ébauche prise dans une barre ou un tube, les surfaces d'appui sont constituées par la surface extérieure et la face tronçonnée mise en place suivant la butée; b) lors de l'usinage d'une ébauche unitaire, il est avantageux de prendre pour surfaces d'appui le trou préalablement usiné et la face de l'ébauche.

Le *défaut de mise en place* est défini : a) dans le cas du serrage de la barre ou du tube sur une pince ou un mandrin, par les déplacements radial et axial de l'ébauche ; b) dans le cas du serrage d'une ébauche unitaire sur un mandrin à trois mors pour le fraisage d'un trou brut de fonderie, par le déplacement radial de l'ébauche ; c) dans le cas de brochage du trou le défaut de mise en place n'a pas lieu ; d) dans le cas de l'usinage sur un mandrin extensible serré entre pointes, le défaut de mise en place n'a pas lieu non plus ; e) lorsque l'usinage s'effectue sur un mandrin extensible serré sur un plateau, par le déplacement radial infime du mandrin, qui peut être éliminé par le serrage dans des mors n'ayant pas subi de traitement thermique et tournés après la pose du plateau sur la machine [1].

Le défaut de mise en place n'intervient pas pour modifier les tolérances sur les cotes diamétrales imposées ; il ne joue un rôle que lorsque les surfaces de référence et d'appui ne coïncident pas, pour modifier les tolérances sur les cotes linéaires ; pourtant, les surépaisseurs d'usinage prévues pour les cotes diamétrales et axiales doivent être augmentées pour compenser le défaut de mise en place.

Les *défauts de positions relatives* sont déterminés : a) lors de la fabrication des bagues à partir d'une barre ou d'un tube, par la courbure locale de l'ébauche et l'écartement de l'axe pendant l'exécution du trou ; b) lors de la fabrication des bagues à partir des ébauches unitaires moulées ou pressées, par l'écartement de l'axe du trou, l'excentricité des surfaces extérieures par rapport au trou et le voile des faces, tous ces défauts étant produits en cours d'usinage.

En modifiant la profondeur de coupe en usinage, les défauts de positions relatives agissent sur la valeur des refoulements dans le système élastique machine-outil-pièce, mais n'entrent pas directement dans la formule du calcul de la tolérance ; par ailleurs, ces défauts interviennent sur la valeur des surépaisseurs ; lors du calcul des surépaisseurs prévues pour les cotes diamétrales, ces défauts s'ajoutent au défaut de mise en place suivant la règle du rectangle, et dans le cas des surépaisseurs prévues pour les cotes axiales, suivant les règles de l'arithmétique.

La *gamme d'usinage des bagues et l'équipement mis en œuvre* sont essentiellement fonction du type des ébauches.

Si les bagues sont fabriquées à partir d'une barre, le routage préférentiel est le suivant.

1. Dressage de la face de la barre, avance de la barre à refus, centrage pour perçage, perçage du trou et tournage de la surface extérieure, alésage ou fraisage du trou et tournage de la surface extérieure avec chanfreinage de la face

[1] Pour les défauts de mise en place sur une pince et sur un mandrin, voir l'Annexe 1.

en l'air, alésage ébauche, alésage finition, tronçonnage (fig. 262); cette phase se fait sur un tour revolver ou sur un tour automatique mono- ou multibroche.

2. Chanfreinage de la face opposée sur une perceuse verticale ou un tour d'opération.

3. Perçage du trou de graissage sur une perceuse verticale.

4. Exécution des pattes d'araignée sur une machine d'opération.

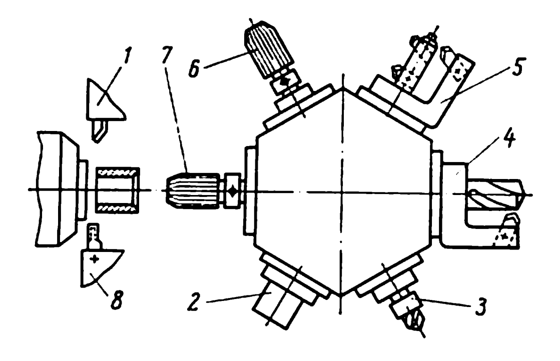


Fig. 262. Façonnage schématisé d'une bague sur un tour revolver:

1 — dressage d'une face; *2* — avance de la barre jusqu'à refus; *3* — centrage pour perçage; *4* — perçage du trou et tournage de la surface extérieure; *5* — alésage du trou, tournage de la surface extérieure et chanfreinage; *6* — alésage ébauche; *7* — alésage finition; *8* — tronçonnage

Fig. 263. Fraisage et chanfreinage d'un trou de bague

5. Rectification de la surface extérieure sur une rectifieuse cylindrique ou une rectifieuse sans centre.

Lorsque les bagues sont fabriquées à partir d'un tube, la reprise de perçage doit être naturellement exclue; elle est remplacée par l'alésage ou le fraisage du trou; pour le reste, la gamme d'usinage ne se distingue en rien de celle d'une bague prise dans une barre.

Dans le cas des bagues exécutées à partir des moulages ou des pièces forgées unitaires, le routage le plus avantageux se présente comme suit:

1. Le fraisage d'un trou et son chanfreinage sur une perceuse verticale (fig. 263); étant donné que lors du serrage de la bague sur un mandrin la surface extérieure constitue une surface d'appui, le calcul de la surépaisseur de fraisage s'effectue suivant la formule (135) compte tenu de l'écartement de l'axe du trou brut de fonderie et du défaut de mise en place de la bague sur le mandrin.

2. Le brochage du trou sur une machine à brocher horizontale comportant un plateau sphérique à rotule dont l'utilisation est

définie par la face brute de la bague ; le brochage ne corrigeant pas l'écartement résiduel de l'axe du trou et le défaut de mise en place n'ayant pas lieu, la surépaisseur de brochage est calculée suivant la formule (135), en négligeant les grandeurs placées sous la racine carrée, et en ne tenant compte que de la hauteur des rugosités et de la profondeur de la couche superficielle défectueuse. Pour les bagues posées à force dans un corps, on prévoit généralement après le brochage une surépaisseur excédentaire pour finir le trou après la pose.

3. Le tournage unitaire ou dégrossissage de la surface extérieure suivant la précision de l'exécution de l'ébauche brute, la saignée des faces et le chanfreinage extérieur sur un tour semi-automatique à outils multiples ; la phase est exécutée avec positionnement sur le trou sur un mandrin expansible ou par emmanchement à force de la bague sur un mandrin cylindrique.

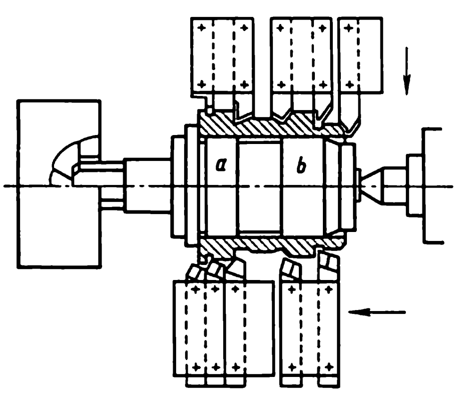


Fig. 264. Façonnage d'une bague étagée sur une machine semi-automatique à outils multiples

Lors du calcul de la surépaisseur prévue pour le diamètre, le défaut de mise en place peut être négligé, alors que celui de positions relatives doit inclure l'écartement résiduel de l'axe du trou apparu après le fraisage. Pour les faces, les défauts de mise en place et de positions relatives n'ont pas lieu.

4. Le tournage de finition de la surface extérieure, si au lieu d'un tournage unitaire on effectuait le dégrossissage ; le dressage de finition des faces n'est effectué que dans le cas où la tolérance sur la longueur et les prescriptions imposées aux faces le rendent nécessaire ; la phase se fait alors sur un tour automatique à outils multiples ; une surface extérieure lisse peut être façonnée sur un tour usuel ; lorsque la surface extérieure comporte des fusées, la phase s'opère sur un tour semi-automatique à outils multiples (fig. 264), le mandrin étant posé à force sur les portées *a* et *b*.

Les quatre phases suivantes sont identiques aux phases 2, 3, 4 et 5 du routage de la bague fabriquée à partir d'une barre.

Les gammes d'usinage des bagues de différentes constructions ne se distinguent que par le réglage prévu pour le façonnage des surfaces extérieures sur des tours semi-automatiques à outils multiples. Les bagues à trou conique sont fraisées et alésées à l'outil conique avec avance jusqu'à la butée. Lors de l'usinage par outils multiples des

bagues coniques fendues, l'outil prévu pour la surface conique est guidé par un reproducteur; d'autre part, on prévoit pour ces bagues un fraisage pour l'exécution de la fente et des entailles sur la surface extérieure, ainsi que du filetage aux extrémités de la bague. Pour les bagues régulées d'alliage antifriction, les gorges du trou se font par tournage intérieur. Les bagues roulées à cordon ouvert sont usinées d'une manière analogue à celle des bagues moulées lisses, un joint étant fixé dans le cordon par une brasure facilement fusible; après l'usinage le joint est dégagé.

Les bagues en cermets sont généralement fabriquées à base de fer ou de cuivre. Les matériaux à base de cuivre se distinguent par un petit coefficient de frottement, une bonne aptitude au rodage, mais leur charge de rupture est plus faible que celle des matériaux à base de fer.

Lors de l'usinage des pièces en cermets à base de fer, les outils à plaquettes rapportées en carbure dur BK8 assurent une tenue élevée, alors qu'une arête de raccordement à l'angle d'affûtage de 1,5 à 2° assure un très bon état de surface à des régimes de coupe v = 200 à 400 m/mn, a = 0,05 à 0,15 mm/tr; p = 0,5 à 1,2 mm.

Pour améliorer les propriétés antifriction, les bagues poreuses après frittage sont imbibées d'huile d'aviation dans un bain porté à 110 ou 120°. La durée de cette opération varie suivant l'épaisseur de 45 mn (pour une paroi de 4 mm) à 120 mn (pour une paroi de 9,5 mm).

Pour les bagues poreuses, le calibrage des trous à la bille n'est pas recommandé, car les pores sont alors partiellement obstruées et la capacité d'autolubrification de la bague diminue; il est donc plus avantageux de façonner le trou par tournage intérieur fin. Compte tenu de la précision élevée que les gammes d'usinage prévoyant l'utilisation des outils en cermets permettent d'obtenir, on se borne généralement à l'usinage unitaire.

Les bagues en matières plastiques peuvent être fabriquées à partir d'une barre, d'un tube ou d'une ébauche unitaire obtenue sous pression. La gamme d'usinage des bagues à partir d'une barre ou d'un tube est analogue à celle d'exécution des bagues métalliques. La précision élevée assurée par l'exécution des bagues obtenues sous pression à partir d'une ébauche unitaire permet de limiter l'usinage à une seule opération de coupe.

Le *contrôle des bagues* comprend la vérification des cotes diamétrales et axiales, de l'état de surface (suivant les étalons d'état de surface, surtout), de la concentricité des surfaces extérieures avec le trou, et du voile des faces. Pour vérifier les surfaces extérieures de révolution, leur concentricité avec le trou et le voile des faces, l'application d'un dispositif à comparateurs multiples, analogue à celui utilisé pour les arbres à fusées, est d'une aide précieuse.

D. Gammes d'usinage des roues dentées

Les *variétés de construction principales* des roues dentées sont représentées sur la figure 265. Suivant les indices technologiques rn distingue : a) les roues à une couronne : cylindriques à denture droite ou hélicoïdale; coniques, à denture droite ou hélicoïdale; les vis

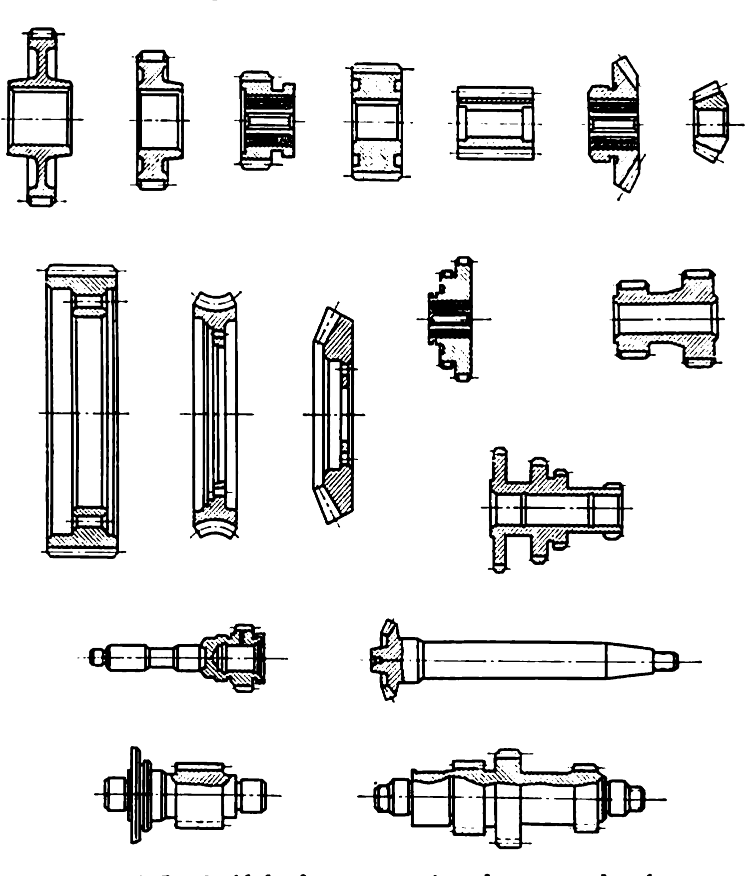


Fig. 265. Variétés de construction des roues dentées

sans fin; on distingue également les roues à moyeu et à flasque; b) les roues cylindriques à couronnes multiples; c) les roues solidaires de l'arbre, cylindriques ou coniques à une couronne; d) les roues solidaires de l'arbre, cylindriques à couronnes multiples.

Les prescriptions imposées par la fabrication des roues sont caractérisées par les données suivantes: le trou central est exécuté

suivant la 2e classe de précision et la 7e classe d'état de surface; le trou de centrage des pignons à flasque, suivant la 1ère ou la 2e classe de précision et la 7e classe d'état de surface; la largeur du flasque (cote prévue pour les trous de boulonnerie) suivant la 3e ou 3a classe de précision, l'état de surface des faces, suivant la 7e classe.

Les portées des roues solidaires de l'arbre sont exécutées suivant la 2e classe de précision et la 7e ou 8e classe d'état de surface.

Les autres spécifications dimensionnelles sont réalisées suivant la 3a, la 4e ou la 5e classe de précision et la 2e ou la 5e classe d'état de surface. Le contour intérieur non conjugué des pignons à flasques est généralement réalisé suivant la 7e classe de précision et la 2e d'état de surface.

Les défauts de perpendicularité des faces du moyeu et de la couronne dentée par rapport à l'axe du trou (voile des faces) peuvent atteindre 0,15 μ et plus par 1 mm de diamètre, suivant les conditions de travail de la roue.

Les prescriptions relatives à la fabrication des dentures sont imposées par les normes.

Matière d'œuvre. Les roues cylindriques et coniques très sollicitées sont fabriquées essentiellement en aciers au chrome, au chrome-nickel, au chrome-molybdène aptes à être cémentés; les fontes et la fonderie d'acier ainsi que l'acier de la nuance Cт. 5 s'emploient pour la fabrication des engrenages travaillant à la vitesse périphérique $v \leqslant 3$ m/s; les roues en matières plastiques servent surtout dans les chaînes cinématiques; le bronze ou la fonte antifriction sont mis en œuvre pour les vis sans fin.

Types des ébauches. La barre s'emploie pour la fabrication des roues d'un diamètre de 50 à 60 mm; pour des pièces plus grandes on emploie des pièces forgées, moulées ou pressées en matières plastiques.

Les pièces forgées sont exécutées par estampage à chaud, forgeage sur matrices volantes ou forgeage libre suivant le nombre de pignons à obtenir; les ébauches prévues pour des roues à une courronne sont estampées sur des marteaux-pilons ou des presses à forger mécaniques; les ébauches pour des roues à couronnes multiples et les pignons solidaires de l'arbre sont généralement estampées sur des machines à forger horizontales; les ébauches de petits pignons solidaires de l'arbre sont souvent obtenues par forgeage à froid; parfois les ébauches estampées sont calibrées par frappage, ce qui permet d'éliminer avant le brochage tout façonnage à l'outil des faces.

Pour un volume de fabrication considéré, le choix d'une barre ou d'une pièce forgée comme matériau de départ de la fabrication est conditionné par la différence entre les coefficients d'utilisation

du métal ; l'avantage présenté par l'utilisation d'une ébauche estampée est défini par l'inégalité

$$\frac{g\,(G''-G')}{G'G''} \geqslant 0{,}05,$$

où g est le poids de la pièce finie ;

G', le poids de départ du métal constitutif d'une ébauche estampée;

G'', le poids d'une ébauche prise dans une barre.

Pour choisir le type d'ébauche, il faut également tenir compte du fait suivant : une rédaction convenable de la gamme d'estampage et de la gamme du traitement thermique préalable de l'ébauche brute permet de réaliser une structure fine, une disposition favorable des fibres du métal et de réduire au minimum le gauchissement de l'ébauche lors de son traitement thermique terminal. Par ailleurs, l'ébauche peut être obtenue avec un trou poinçonné, ce qui permet de réaliser une économie importante de métal. Lors de l'estampage sur marteaux-pilons, le poinçonnage est possible pour les diamètres de trous $d \geqslant 25$ mm et les longueurs $l \leqslant 2\ d$.

Le traitement thermique préalable des pièces forgées ultérieurement cémentées consiste à les normaliser pour rendre la structure plus homogène et fine et améliorer l'usinabilité ; la normalisation élève également la dureté et améliore les propriétés mécaniques de l'acier.

Les ébauches brutes des roues en acier, non soumises à la cémentation, subissent généralement un traitement thermique d'amélioration destiné à rendre la structure plus fine et à élever la ténacité.

Les pièces sont moulées avec la denture en sable à la machine ou par coulée centrifuge. Les roues lourdes sont également exécutées par le moulage à découvert au sol, souvent aussi avec la denture. La couronne en bronze des roues hélicoïdales est coulée parfois sur une ébauche en fonte ou en acier déjà moulée ; souvent la couronne est fabriquée séparément pour être ensuite montée à force sur la roue.

Gammes d'usinage et équipement utilisé. D'après leur forme et les spécifications dimensionnelles les roues (voir fig. 265) ne constituent pas un groupe de fabrication à part. Il n'y a que l'usinage de la couronne dentée qui soit pour elles un indice technologique commun. Aussi les gammes d'usinage des roues ne se distinguent-elles en rien de celles d'autres pièces (bagues, disques à moyeu ou sans moyeu, poulies, arbres pleins ou creux, etc.), à l'exception du taillage des dentures.

Lors du façonnage de petits pignons à partir d'une barre calibrée, la première phase qui comprend le perçage et l'alésage du trou, le tournage de la surface extérieure, le dressage des faces et le tronçonnage de l'ébauche se fait, en fonction du volume du programme imposé, sur des tours automatiques multibroches horizontaux ou

des tours revolver. Ensuite on effectue le brochage du trou et des cannelures ou de la rainure de clavette, et puis le tournage de finition et le dressage des faces sur un tour semi-automatique à outils multiples, pour les roues de précision, la rectification des faces, ou leur dressage fin sur un tour précis à coupe rapide.

Dans la fabrication de masse ou en grande série, le routage rationnel des ébauches unitaires de petits pignons (d'un diamètre de 150 à 200 mm) obtenues par estampage ou moulage, avec ou sans trou, est le suivant:

1. Perçage (fraisage) du trou sur une perceuse avec la mise en place de l'ébauche sur un plateau; dans ces conditions il est recommandé de réaliser le lamage de la face si ses cotes le permettent.

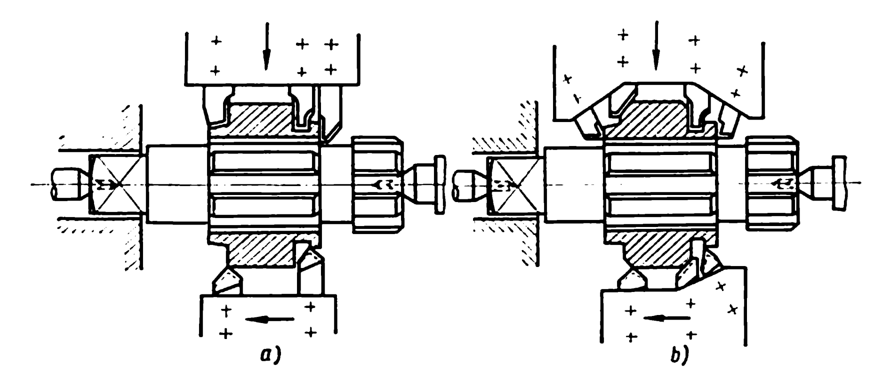


Fig. 266. Schéma de réglage d'un tour semi-automatique à outils multiples pour l'exécution d'un pignon à une couronne:
a — dégrossissage; *b* — finition

2. Brochage du trou et des cannelures ou des rainures de clavette.

3. Montage à force de l'ébauche sur un mandrin centré avec fixation de la position de sa face avant suivant la longueur du mandrin.

4. Façonnage de la surface extérieure sur un tour semi-automatique à outils multiples en deux phases (fig. 266). La possibilité et les conditions de l'application de cette variante à productivité élevée sont liées aux particularités de la construction de l'ébauche.

Un ajustement stable de l'ébauche sur le mandrin d'un diamètre d est possible si la longueur d'ajustement l est suffisante et le diamètre de la jante D est relativement petit. On considère que cela est réalisable si $l > d$ et $D \leqslant 9\ d$.

L'usinage sur un mandrin lisse des ébauches comportant des trous mais n'ayant pas de cannelures ou de rainures de clavette peut être suivi d'un pivotement de l'ébauche sous l'effet d'un moment

de torsion. C'est pourquoi les mandrins lisses ne sont employés que pour l'exécution des ébauches de petit diamètre lorsque la profondeur de coupe est peu importante.

La figure 267 représente un réglage type d'un tour semi-automatique à outils multiples prévu pour l'usinage d'une roue à couronnes multiples.

Dans la fabrication de masse, les roues estampées et moulées sont également façonnées sur machines semi-automatiques multibroches verticales (fig. 268) réglées pour un cycle effectué en deux phases ou pour deux cycles effectués en une phase et deux sous-phases. Dans la fabrication en grande série, les ébauches analogues sont usinées sur des tours revolver dont les réglages types prévoient deux phases, et lorsque les ébauches sont grosses, sur des machines à plateau carrousel. Les roues solidaires de l'arbre sont exécutées d'une manière analogue aux arbres à fusées. La figure 269 représente le schéma de réglage d'une machine, typique dans la fabrication de masse et établi pour l'usinage d'une ébauche de roue solidaire de l'arbre.

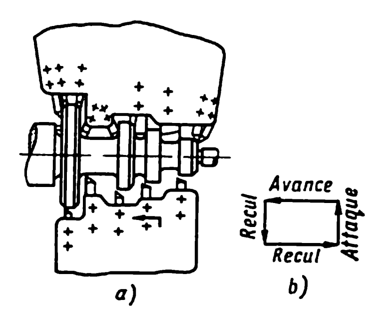


Fig. 267. Schéma de réglage d'un tour semi-automatique à outils multiples pour l'usinage d'une roue à couronnes multiples:

a — schéma de réglage; b — cycle de travail du chariot avant avec engagement suivant la normale à l'axe de rotation

Les trous cannelés d'un diamètre inférieur à 200 mm se font généralement à la broche complexe à dégrossir, puis à la broche de calibrage à coupe latérale. En construction mécanique lourde, l'exécution des trous cannelés d'un diamètre supérieur à 200 mm avec des broches complexes ne présente aucun avantage économique, car dans le cas d'une grande profondeur des cannelures (supérieure à 25 mm) il faut disposer d'un jeu de trois à six broches à dégrossir et d'une broche à calibrer. Bien que les grosses broches se fassent creuses, leur fabrication est délicate et exige une quantité importante d'acier à haute teneur en éléments d'alliage. C'est pourquoi il est plus avantageux d'exécuter les gros trous cannelés par brochage de chaque cannelure séparément avec l'utilisation d'un adapteur qui comporte une rainure longitudinale pour guider la broche et d'un dispositif de division. A l'Usine de constructions mécaniques de l'Oural on met en œuvre deux méthodes de brochage de gros trous cannelés. La première consiste à brocher d'abord les rainures à la broche à dégrossir prévue pour les rainures de clavette, puis le trou est fini en une passe par une broche pour cannelures complexes. La deuxième méthode prévoit le dégrossissage et le calibrage de

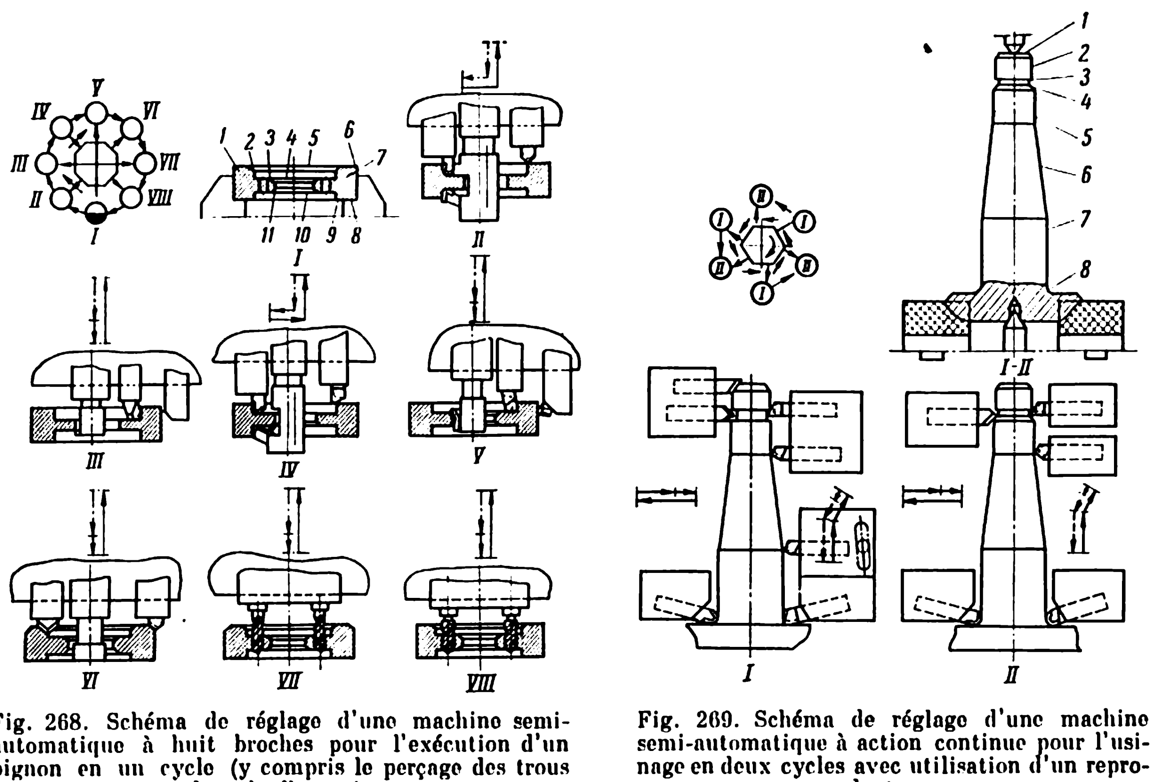


Fig. 268. Schéma de réglage d'une machine semi-automatique à huit broches pour l'exécution d'un pignon en un cycle (y compris le perçage des trous dans le flasque) :

1-11 — surfaces façonnées

Fig. 269. Schéma de réglage d'une machine semi-automatique à action continue pour l'usinage en deux cycles avec utilisation d'un reproducteur :

1-8 — surfaces façonnées

chaque rainure par des broches correspondantes sur un dispositif assurant la division suivant le pas.

Les ébauches prévues pour l'exécution de la denture subissent encore le fraisage ou le taillage de la denture, ces opérations étant définies par la construction du pignon.

Pour l'exécution de la denture, les roues solidaires de l'arbre sont montées entre pointes, alors que les roues à trou, sur des mandrins.

Pour assurer la productivité, les roues de faible module ($m \leqslant 4$ à 5 mm) se fabriquent en une phase alors que celles d'un module important, par dégrossissage et finition.

Pour réduire la quantité de travail, le dégrossissage ainsi que la finition d'une denture peu précise se font à la fraise mère à filets multiples. La finition s'opère par une fraise à un filet à dents rectifiées ou par un outil à mortaiser. Pour une denture de faible module ($m \leqslant 2{,}5$ à 3 mm), le mortaisage des dents est plus avantageux que le fraisage ; à mesure que le module des dents et le diamètre des roues augmentent, les régimes réalisés par la machine à mortaiser baissent, diminuant ainsi la productivité. Le mortaisage est le seul mode possible d'exécution des dents intérieures et des dents des pignons à couronnes multiples lorsque la construction n'assure pas à la fraise mère la possibilité d'attaque et de dégagement lors du fraisage de la denture.

Le fraisage de dégrossissage d'une ébauche de roues coniques à denture droite se fait avec des fraises disques par division sur des machines spéciales avec mise à la cote des outils multiples pour l'exécution d'un lot de pièces ou sur une fraiseuse horizontale courante munie de diviseur.

La finition des dents droites s'opère par taille par engrènement sur des machines à raboter les engrenages.

Le façonnage des dents à l'outil est une opération onéreuse demandant une quantité de travail importante ; la quantité de travail nécessaire pour l'exécution de la denture constitue 60 % de celle nécessaire à la fabrication de toute la roue ; 9 à 15 % du poids de l'ébauche se perdent en copeaux, alors que la résistance de la denture baisse nettement. Dans ces conditions il fallait établir d'autres procédés de fabrication. Parmi ces procédés nouveaux il y a la génération des dents par déformation plastique à chaud. Certaines entreprises mettent en œuvre cette méthode pour la fabrication des roues cylindriques. Leur prix de revient diminue de 20 % par rapport à celui des roues à dentures fraisées, alors que leur tenue à l'usure augmente de 50 à 70 %.

Le moletage des dents se fait sur des bancs spéciaux par refoulement à la molette du métal de l'entredent. Ce procédé assure l'obtention d'un profil denté très précis et un état de surface de la 5e à la 8e classe.

Le taillage des roues coniques à denture circulaire est réalisé par une tête à outil sur des machines à tailler les engrenages par engrènement.

La quantité de travail relativement importante nécessaire pour l'exécution des dentures incite les agents de méthodes à rechercher des procédés plus efficaces. L'augmentation de la productivité est obtenue par l'application des fraises à filets multiples, le fraisage aux avances et vitesses élevées, le moletage des dents à chaud, le brochage avec un outil de forme, le façonnage simultané de plusieurs roues placées autour d'un seul outil de mortaisage de grand diamètre, le défonçage simultané de toutes les dents avec un outil de forme, et d'autres méthodes.

Le taillage des dents est suivi par un arrondissage sur une machine semi-automatique spéciale ; cette opération est prévue pour les arêtes d'engrènement des pignons qui assurent le changement des rapports.

Après cette opération on effectue le rasage des dents dans le but de corriger les défauts du taillage et d'améliorer l'état de surface ; le rasage (shaving) améliore nettement la précision ; pour les pignons de module de 2 à 5 mm, notamment, ceci est illustré par les données suivantes :

Valeur des défauts en μ

Eléments des défauts	Avant le rasage	Après le rasage
pour le pas	20 à 30	8 à 12
pour le profil	20 à 30	5 à 10
pour la spirale d'une dent sur une longueur de 30 mm	50	10
pour le faux-rond de la circonférence primitive pour les diamètres de 50 à 400 mm	70 à 100	25 à 35

Lors de l'exécution des pignons cylindriques non trempés, le shaving est la dernière opération ; cette opération se fait avant le traitement thermique afin de réduire les déformations que ce traitement est susceptible de produire.

Une dent en tonneau est obtenue soit par basculement de la table de la machine à raser soit par utilisation d'un outil à profil spécial. Parmi les différentes façons de réduire l'épaisseur de la dent au sommet, un tel outil donne le meilleur résultat.

Après le taillage les dents coniques sont vérifiées par engrènement sur des machines à vérifier appropriées ; cette opération est la dernière avant le traitement thermique.

Assurant une bonne qualité et une productivité élevée, le shaving a trouvé une large application dans la fabrication des pignons cylindriques, mais il n'est pas utilisé dans la fabrication des pignons coniques, car son application est alors très compliquée et peu efficace.

Le traitement thermique des roues fabriquées en aciers de nuances susceptibles de recevoir la cémentation prévoit : 1) la protection contre la cémentation des éléments de la roue ne subissant pas la trempe ; elle se fait en les enduisant d'un mélange de verre liquide et de poudre d'amiante ou par cuivrage ; 2) cémentation ; 3) trempe et revenu. Pour réduire le gauchissement, les roues à flasques sont trempées dans des matrices spéciales sur des presses à tremper ; la déformation est également diminuée par trempe isotherme ou étagée. Il faut pourtant noter qu'une part importante de la déformation totale des ébauches cémentées résultant de leur traitement thermique revient à la cémentation.

Les roues en aciers de nuances trempables subissent la trempe et le revenu ; dans ces conditions, il est avantageux de recourir à la trempe superficielle des dents, réalisée essentiellement par des courants haute fréquence.

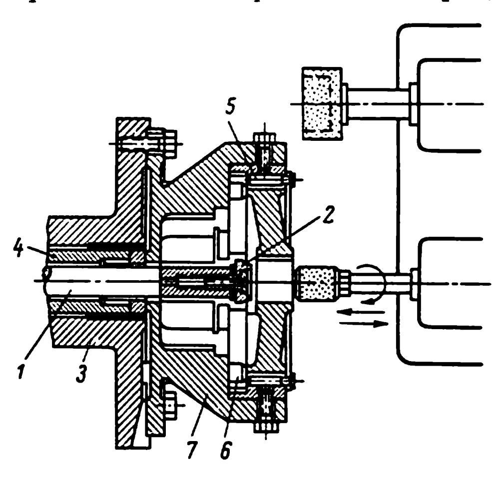


Fig. 270. Schéma de réglage pour la rectification du trou central et de la face d'un pignon :

1 — tige ; 2 — calibre ; 3 — plateau de la machine ; 4 — tige du cylindre pneumatique ; 5 — rouleaux de positionnement de l'ébauche ; 6 — axes de support du mandrin ; 7 — corps du mandrin

L'application des mesures indiquées et l'observation rigoureuse des régimes de traitement thermique permettent de réduire d'une façon appréciable les déformations dont les valeurs doivent être prises en considération lors de l'usinage antérieur. On peut alors éliminer, diminuer ou remplacer par le rodage la rectification des dents qui est une opération exigeant une quantité de travail très importante.

Les opérations qui succèdent au traitement thermique sont les suivantes.

On procède avant tout à la rectification du trou central avec positionnement sur la circonférence primitive de la roue. Pour les roues à flasques, cette opération est réunie avec celle de la rectification de la face (en deux reprises avec une seule mise en place de l'ébauche). C'est le mode d'action qui permet de réduire au minimum le défaut de perpendicularité du plan de la face par rapport à l'axe du trou (fig. 270). Ensuite, au besoin, on rectifie la deuxième face (opposée) sur une rectifieuse plane verticale (l'usinage se fait par

la face de la meule) ; cette opération prévoit la mise en place par la face opposée déjà rectifiée.

Pour les trous cannelés, conjugués suivant le fond des creux, on réalise le calibrage des fonds et des surfaces latérales des cannelures ; cette phase se fait par brochage sur une presse ; le guidage de la broche de calibrage est assuré par le trou rectifié suivant les crêtes des cannelures. Pour les surfaces cannelées, conjuguées suivant les surfaces latérales des cannelures, la rectification du trou peut être supprimée et son usinage peut se borner au calibrage des surfaces latérales des cannelures avec une broche.

Après l'exécution du trou, on procède au rodage des dents sur une machine semi-automatique, ou à leur rectification sur une machine à rectifier les engrenages. La surépaisseur à enlever par rodage ne doit pas dépasser 50 μ car, si elle est plus grande, on peut compromettre le profil de la dent. Ainsi que nous l'avons déjà signalé, la rectification des dents est une opération réclamant une quantité de travail très importante, et qui n'est donc mise en œuvre que pour des engrenages très précis [1].

Contrôle. La précision des roues dentées est caractérisée par les éléments suivants :

précision cinématique et transmission uniforme de la rotation à l'élément conjugué ;

surface de contact imposée des flancs des dents ;

valeur et constance du jeu latéral entre les profils non sollicités ;

état de surface des flancs des dents ;

bruits accompagnant le fonctionnement des roues (pour des transmissions à grande vitesse).

La valeur de chaque élément varie en fonction des conditions diverses d'utilisation des roues.

Dans la fabrication des roues, le contrôle définitif se fait soit par vérification directe de l'engrenage fini, soit par vérification préventive de l'équipement.

Dans le premier cas, c'est-à-dire lors du contrôle définitif direct de la roue finie, on vérifie d'après un indice défini l'ensemble des défauts qui caractérisent l'aptitude de la roue à la fonction. La vérification doit se faire les surfaces de référence et de montage étant confondues. Les pignons petits et moyens des engrenages importants sont vérifiés généralement par contrôle direct de l'ensemble des défauts des pignons finis.

Par ailleurs, au cours du réglage de chaque opération d'exécution des dentures, les défauts de fabrication qui conduisent au manque

[1] Les défauts de rectification des dents suivant la machine employée se situent dans les limites :

1) pour le profil, de 2 à 5 μ ; 2) pour le pas, de 3 à 6 μ ; 3) pour le faux-rond de 10 à 20 μ ; 4) dans le sens de la dent sur une longueur de 15 mm, 2.5 μ.

de précision d'usinage sont mis en évidence par la vérification des éléments liés directement à la mise à la cote de la machine (défauts de la machine, défauts géométriques des outils et de leur mise à la cote, défauts de mise en place de l'ébauche, etc.). Pour mettre mieux en évidence la façon dont chaque facteur intervient isolément, il convient lors de la vérification de faire coïncider la surface de référence avec la surface à usiner et non pas avec la surface de montage, comme il est d'usage lors du contrôle définitif.

Ainsi, dans les conditions de la fabrication, le contrôle définitif des roues est associé à la vérification par éléments en cours de fabrication ainsi qu'à la vérification préventive de l'équipement.

Lors de la fabrication de gros engrenages, il est pratiquement impossible de créer des appareils susceptibles de permettre la vérification avec une erreur de lecture relativement faible (quelques microns pour des diamètres de plusieurs mètres); on recourt donc à la vérification préventive des moyens de fabrication par éléments du système technologique notés plus haut qui participent à la génération de la surface des dents.

En construction mécanique on assiste actuellement à une augmentation des vitesses et des charges, ce qui implique des exigences élevées quant à la précision d'exécution et à la qualité des états de surface des dents. D'autre part, la productivité des modes d'exécution des dents est incomparablement plus faible que celle des modes d'usinage des ébauches précédant l'exécution de la denture. Le problème se pose donc de rechercher de nouveaux modes d'exécution des dents. Les méthodes actuelles de génération des dents sont fondées généralement sur une cinématique d'usinage très compliquée, liée à des mouvements multiples bien coordonnés de l'outil et de l'ébauche. La multiplicité des mécanismes d'exécution des machines rend impossible la rigidité requise de l'ensemble du système, qui est un des facteurs impératifs de la précision et de la productivité. La conjugaison des pièces des mécanismes d'exécution se fait avec des jeux qui sont l'obstacle principal d'accroissement de la rigidité. L'usure des éléments conjugués compromet la précision des mouvements d'exécution coordonnés et diminue nettement la rigidité du système machine-pièce-outil. Ceci conduit à la réduction de la force de coupe, et donc à la baisse de la productivité. C'est pourquoi on s'efforce de simplifier le cycle de travail afin d'obtenir le profil et la position relative des dents imposés non pas par la combinaison des mouvements multiples des outils et de l'ébauche mais par un choix judicieux de la construction de l'outil, qui réduit au strict minimum les mouvements d'exécution de la machine, en renforçant ainsi la rigidité du système.

Parmi les solutions de ce genre il y a le brochage des dents. A l'usine Ford de Dirborn et à l'usine de voitures automobiles de

Gorki ce procédé a été appliqué à la fabrication de la came dentée de la direction. Pourtant la simplicité du profil rectiligne de ces dents du type à crémaillère et leur nombre (deux, et plus tard, trois) rendaient la tâche plus facile par rapport à celle de génération des dents suivant toute la circonférence.

Les tentatives d'exécution des dents par pivotement progressif de la roue sur son axe n'ont pas abouti, car les machines utilisées reproduisaient les défauts des machines à tailler les engrenages usuelles. Les défauts d'indexage et l'application unilatérale de la force de coupe rendaient impossible l'obtention d'un pas circonférenciel régulier.

En 1939, on a mis en œuvre une broche ronde taillant simultanément toutes les dents d'une roue cylindrique (usinage simultané de toutes les dents). La broche était constituée d'une série successive d'anneaux montés sur un mandrin tubulaire. Les anneaux étaient séparés par des jeux qui formaient des poches susceptibles de recevoir les copeaux. Les dimensions de ces poches devaient être prévues de façon à loger tous les copeaux enlevés en une course de la broche. Les dents étaient engendrées par une seule course d'exécution.

Des trous, pratiqués dans les jeux entre les sections suivant la circonférence du mandrin, laissaient passer le fluide de coupe. Pendant la course à vide, la pression du fluide s'accroissait automatiquement de plusieurs fois en projetant le copeau des poches par des jets puissants lancés à travers les trous. L'évacuation totale des copeaux et le nettoyage de l'outil avant la course de travail suivante se faisaient par un courant de fluide amené par la tubulure à l'extrémité supérieure du mandrin.

La maison américaine American Browch a lancé au milieu de 1940 une machine à broche verticale pour la génération des dents des pignons cylindriques par un procédé qui se distingue quelque peu de celui qui vient d'être décrit. La broche annulaire est remplacée par un ensemble de broches longitudinales, dont chacune est prévue pour l'exécution du creux d'une dent. Les broches sont serrées sur un porte-outil spécial ; la position des broches isolées par rapport à l'axe de l'ébauche peut être réglée avec précision par un déplacement individuel dans les rainures du porte-outil. De plus, la position de l'ensemble des broches avec le porte-outil peut être réglée également en assurant la concentricité de la circonférence primitive par rapport à l'axe de l'ébauche. Pour élever la productivité, on fabrique des machines à deux broches. La productivité d'une telle machine est dix fois supérieure à celle d'une machine à tailler les engrenages usuelle.

Les nouveaux modes de génération des dents élèvent considérablement la précision de la fabrication des pignons.

Mais il faut noter également que la diminution du bruit produit par le travail des engrenages et, en général, l'amélioration de leurs propriétés fonctionnelles résultent non seulement de la précision d'usinage, mais encore du perfectionnement de la construction et, notamment, de l'application de la forme hélicoïdale des dentures, de l'augmentation du nombre de dents, de leur longueur et de l'angle d'hélice, de l'exécution des dents en forme de tonneau d'une des roues formant le couple d'engrenage, de la diminution de l'épaisseur des dents au sommet, qui compense l'imprécision de positions relatives des trous pratiqués dans une pièce de support et prévus pour des appuis, ainsi que d'autres solutions fonctionnelles.

E. Gamme d'usinage des leviers

Les *variantes de construction* des leviers sont représentées sur la figure 271. Les leviers comportent un ou plusieurs trous principaux associés aux axes perpendiculaires ou parallèles; d'autre part, les

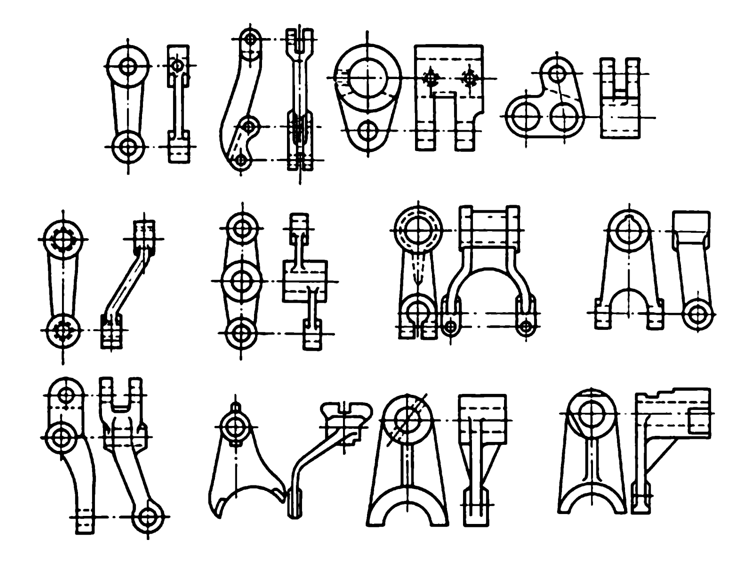


Fig. 271. Variantes de construction des leviers

leviers peuvent avoir des trous exécutés à la demande des pièces de boulonnerie, des rainures de clavette, des faces et d'autres éléments.

Les prescriptions imposées par la fabrication des leviers sont les suivantes: a) les trous principaux se font généralement suivant

la 2e ou la 3e classe de précision avec ajustement glissant ou tournant; b) les écarts admissibles des entraxes des trous principaux sont imposés en fonction des conditions de travail du levier et varient de 0,1 à 0,2 mm ou suivant les tolérances sur les cotes libres; c) le défaut admissible de parallélisme ou de perpendicularité des axes des trous principaux doit être compris entre les limites de 0,05 à 0,25 mm et atteint dans certains cas 0,01 mm sur une longueur de 100 mm; d) le défaut de perpendicularité des faces des têtes par rapport aux axes des trous ne doit pas dépasser 1 à 3 μ par 1 mm de rayon de la tête; e) le défaut de parallélisme des trous principaux pratiqués dans les faces des têtes doit se situer entre 0,5 et 2,5 μ par 1 mm de diamètre de la tête; f) l'état de surface des trous principaux ne doit pas être inférieur à la 6e classe, alors que celui des faces des têtes n'est généralement pas supérieur à la 6e classe.

Les rainures de clavette se font entre la 3a et la 5e classe de précision et la 4e et la 6e classe d'état de surface. Parfois les secteurs de travail des leviers subissent un traitement thermochimique avec trempe jusqu'à la dureté $R_C = 56$.

Les *matières d'œuvre* courantes sont les aciers au carbone de nuances usuelles 20 et 35, et dans des cas particuliers, les aciers alliés; la fonte malléable et, parfois, la fonte grise.

Les ébauches se présentent sous forme de pièces forgées ou moulées en acier et en fonte. Pour les ébauches estampées, le frappage plan est très avantageux car il rend inutile le façonnage des faces des têtes ou limite cet usinage à une simple rectification. Les moulages à un trou se font suivant un modèle double; les ébauches ainsi obtenues sont usinées avant la séparation comme des leviers à trois trous principaux. Ces mêmes considérations président à l'estampage de petits leviers à un trou qu'il est plus avantageux d'exécuter sur des matrices à gravures doubles.

Les *prescriptions spécifiques* imposées par la fabrication des leviers sont définies essentiellement par la disposition relative des trous principaux et la perpendicularité des faces des têtes par rapport aux axes de ces trous.

Le positionnement des ébauches est déterminé par la précision de leur exécution. Pour obtenir une position correcte des trous principaux par rapport au contour extérieur des têtes, on choisit ce contour pour surface d'appui primaire en prévoyant la mise en place sur des vés avec appui sur les faces des têtes; leur frappage antérieur les rend convenables pour servir de surfaces d'appui bien sûres. Si la précision de la position des faces des têtes des ébauches brutes n'est pas suffisante, on procède à leur façonnage préalable en positionnant suivant les éléments de l'ébauche qui définissent la distance jusqu'aux faces (généralement, suivant les éléments qui associent les têtes aux trous principaux).

Le défaut de mise en place, lors du positionnement de la tête sur les vés suivant le contour extérieur, se manifeste par le déplacement de l'axe du trou par rapport au contour extérieur. Pour le corriger, il faut employer des montages à vés à centrage automatique.

Les défauts de positions relatives résultent surtout de l'insuffisance de rigidité des leviers et des déformations qui s'ensuivent lors de leur ablocage en cours d'usinage. Les défauts de positions

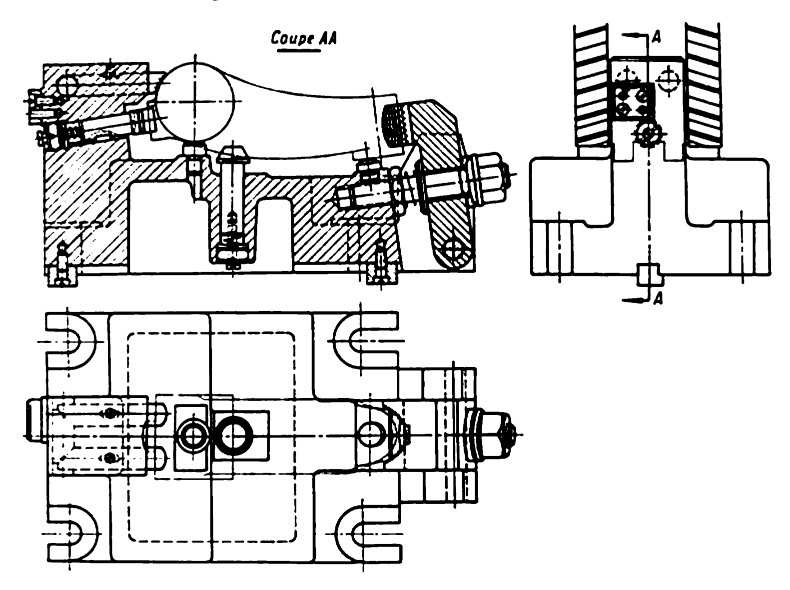


Fig. 272. Montage pour le fraisage simultané des faces d'une tête de levier

relatives dus aux déformations sont surtout l'absence de parallélisme entre les axes et celle de perpendicularité entre les faces des têtes et les axes des trous.

Gammes d'usinage et équipement. Nous avons déjà signalé l'avantage de procéder au frappage des faces des têtes des leviers pour éliminer ou réduire nettement leur usinage ultérieur. Si la nécessité se présente, les faces de chaque tête sont façonnées simultanément sur une fraiseuse horizontale avec un train de deux fraises; dans ces conditions, l'ébauche est serrée sur un montage qui oriente les faces par rapport aux fraises à l'aide de dispositifs spéciaux assurant le positionnement de l'ébauche suivant le corps de la fourchette ou les éléments qui associent les têtes du levier. La figure 272 donne l'exemple d'un tel montage; pour élever la productivité, on peut placer sur la table de la machine deux montages et façonner par avance pendulaire (fig. 273); ces montages peuvent être également

mis sur un plateau d'indexage (fig. 274); dans les deux cas, la mise en place de l'ébauche sur le montage se fait pendant l'usinage de l'autre ébauche serrée sur le deuxième montage. Le schéma de mise à la cote de la fraise horizontale, représenté sur la figure 274, prévoit, en outre, l'usinage par retournement des ébauches.

L'exécution des trous se fait généralement sur des perceuses munies de montages. Le procédé le plus efficace est celui de l'utilisation des machines à unités d'usinage qui permettent l'exécution

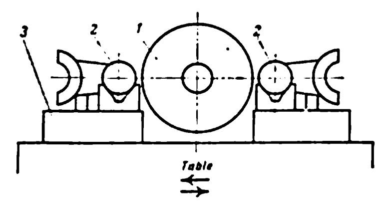


Fig. 273. Façonnage schématisé d'un levier avec avance pendulaire sur une fraiseuse horizontale:

1 — fraise; 2 — ébauches; 3 — montages

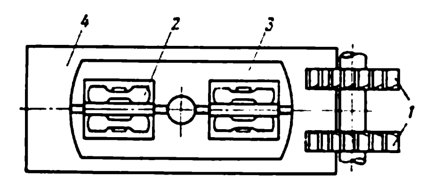


Fig. 274. Schéma d'exécution des faces des leviers sur une fraiseuse horizontale à plateau d'indexage:

1 — fraises; 2 — ébauches; 3 — plateau d'indexage; 4 — table de la machine

simultanée ou mixte de tous les trous à partir d'une seule mise en place. Au besoin, il est possible de réaliser sur les mêmes machines le dressage des faces des têtes avec un outil complexe à avances ralentissant automatiquement.

S'il n'y a qu'un seul trou principal dans le levier (fourchette, levier de passage), après le perçage ou le fraisage il est avantageux de le finir sur une machine à brocher.

Les crêtes, les rainures et les fentes peuvent être exécutées sur des machines à brocher verticales ou sur des fraiseuses horizontales. Les rainures de clavette sont exécutées généralement par brochage.

Le *contrôle* des leviers prévoit, outre la vérification des diamètres des trous et de la largeur des têtes, la vérification de la position des axes des trous principaux et de la perpendicularité des faces des têtes avec les axes des trous.

Le parallélisme des axes des trous est contrôlé au comparateur à l'aide d'arbres témoins dont l'un est posé sur des vés de contrôle et sert de surface d'appui lors de l'opération.

L'entraxe est vérifié avec un calibre mâchoire micrométrique et des arbres matérialisant les trous.

La position angulaire des axes des trous est vérifiée sur un dispositif spécial dans lequel le levier est mis en place par ses deux trous sur des tiges, alors que la position du troisième est vérifiée avec un calibre à limites ou un comparateur suivant l'arbre témoin.

La perpendicularité des faces de la tête à l'axe du trou est vérifiée avec une jauge d'épaisseur à l'aide d'un arbre témoin comportant un rebord ; la coaxialité des axes du trou de la fourchette est vérifiée avec un arbre témoin ; la planéité des faces, avec une règle et une jauge d'épaisseur.

F. Gammes d'usinage des pièces de support

Les pièces mécaniques réunies sous le nom de pièces de support sont très variées. Ce sont les corps cylindriques, coniques, hélicoïdaux et complexes des démultiplicateurs, les boîtes de vitesses de diverses machines, les blocs cylindres des moteurs à combustion interne, etc.

Les prescriptions imposées par leur fabrication sont définies par leur fonction qui consiste à assurer la position requise des éléments des mécanismes. Les particularités des pièces de cette classe sont définies par l'existence de trous prévus pour toute sorte d'appuis et d'éléments plans constituant des surfaces de montage.

Les tolérances imposées aux cotes diamétrales des trous se situent entre la 1re et la 3e classe de précision. Les défauts de forme des trous ne doivent pas dépasser de 0,5 à 0,7 l'étendue du champ de la tolérance. Les tolérances sur les entraxes et sur la perpendicularité des axes des trous sont définies fonctionnellement ; notamment, pour les pièces devant porter des engrenages hélicoïdaux ou non elles varient de 0,04 à 0,06 et jusqu'à quelques dixièmes de millimètre.

Les défauts de coaxialité des trous sont imposés dans les limites ne dépassant pas la moitié de la tolérance sur la cote diamétrale du plus petit trou.

Les trous principaux des corps sont exécutés suivant la 6e ou la 8e classe de précision.

Le défaut admissible de perpendicularité entre les faces et les axes des trous varie de 0,1 à 1,0 μ par 1 mm de rayon. L'état de ces surfaces doit correspondre à la 5e ou 6e classe.

Les défauts de planitude des surfaces ne doivent pas dépasser 50 à 200 μ par 100 mm de longueur. L'état des surfaces planes des joints doit être au moins de la 5e à la 7e classe.

Parmi les *matières d'œuvre* employées pour la fabrication des pièces de support citons les fontes grises, l'acier et les alliages d'aluminium pour les corps moulés, l'acier à faible carbone pour les corps soudés.

Les *ébauches* peuvent être des pièces moulées en fonte grise, en acier au carbone, en alliages d'aluminium ; des constructions soudées.

Les *prescriptions spécifiques de fabrication* sont caractérisées par la nécessité d'assurer les limites imposées aux défauts suivants : a) de parallélisme et de perpendicularité des axes des trous prin-

cipaux entre eux et avec les plans; b) de coaxialité des trous prévus pour recevoir les portées des arbres; c) d'écart des entraxes; d) de géométrie des trous; e) de perpendicularité des faces avec les axes des trous; f) de planitude des surfaces planes.

Positionnement des ébauches. En assurant la coïncidence des surfaces d'appui, de référence et de montage, la surface d'appui étant constante, on rend beaucoup plus aisée la solution des problèmes de fabrication complexes. Pour façonner les surfaces d'appui, on choisit pour élément de départ les trous bruts principaux, ce qui assure un meilleur balancement des surépaisseurs lors de l'usinage ultérieur des trous.

Dans plusieurs cas des bossages spéciaux sont prévus pour servir de surfaces de départ.

Les défauts de mise en place. Lorsque les surfaces d'appui et de référence se confondent, le défaut de positionnement n'a pas lieu et le défaut de mise en place est celui de serrage. Lorsque ces surfaces ne sont pas les mêmes, le défaut de positionnement est défini par l'établissement d'une série dimensionnelle.

Les défauts de positions relatives des moulages, de même que des ébauches soudées, sont caractérisés par le déplacement et l'écartement des axes des trous principaux, apparus en cours de coulée ou de soudage, ainsi que par la déformation des ébauches. On sait que les défauts de positions relatives diminuent progressivement tout au cours de l'usinage, mais après le dégrossissage et la semi-finition ils sont encore assez grands. Or, pendant l'usinage, et surtout après le dégrossissage, la redistribution des tensions internes résultant de l'enlèvement des couches supérieures du métal donne lieu à des déformations nouvelles.

Or, les défauts de positions relatives apparus en cours d'usinage constituent l'ensemble des défauts de positions relatives résiduels d'une ébauche brute et des déformations apparus en cours d'usinage.

Ces défauts compromettent la régularité de la couche de métal enlevée par la coupe et la forme géométrique de la surface usinée, tout en intervenant indirectement sur les écarts de la cote à respecter (sur la valeur Δy). Ces défauts agissent directement sur la valeur des surépaisseurs.

Pour calculer les défauts de positions relatives suivant les formules (52) ou (52a), en fonction des procédés de fabrication, il faut tenir compte des déformations de l'ébauche résultant de la redistribution des tensions internes; à cet effet, en calculant les surépaisseurs d'usinage, on multiplie les défauts de positions relatives par 2.

Gamme d'usinage et équipement. En premier lieu on procède à l'usinage des surfaces d'appui et des trous prévus pour les pièces de fixation, qui peuvent servir pour la mise en place ultérieure;

ensuite on exécute tous les plans et les trous principaux. Les surfaces d'appui des corps peu rigides sont finies par un deuxième usinage (de contrôle) effectué après dégrossissage.

Le calcul des surépaisseurs définit la nécessité d'inclure la semi-finition dans la gamme d'usinage.

Pourtant, compte tenu de la diminution régulière des défauts de forme et de positions relatives, on se borne au dégrossissage et à la finition, en n'effectuant l'usinage unitaire que des pièces très rigides exécutées suivant un mode de fabrication très précis.

L'usinage définitif (rectification ou usinage fin à l'outil) s'effectue dans le même ordre: d'abord les plans, puis les trous principaux.

L'usinage des ébauches coulées se fait soit avec traçage total ou partiel, soit sans traçage sur des montages; le procédé est défini par le mode d'exécution des ébauches.

Les constructions soudées des corps se fabriquent à partir de pièces usinées ou non usinées.

Dans le premier cas, les corps sont soumis au dégrossissage, à la semi-finition et à la finition qui, en fonction de la quantité de travail et de la précision de soudage imposée, se font soit suivant le traçage, soit sur des montages. Dans le deuxième cas, les surfaces élémentaires des corps ne subissent qu'une finition sans traçage, car leur soudage s'opère sur des montages assurant une précision suffisante de la position relative des éléments. Dans ces conditions, la mise en place de grosses pièces prévoit un dégauchissage suivant les surfaces usinées avant soudage, alors que l'usinage de petites pièces se fait sur des montages.

Dans la fabrication sérielle, les plans des corps sont façonnés sur des raboteuses à chariots multiples ou sur des fraiseuses genre raboteuse multibroches; dans la fabrication de masse, ils sont exécutés sur des machines à brocher, sur des fraiseuses multibroches à action continue à tables circulaires ou à tambour. Sur les deux derniers types de machines, on utilise généralement le procédé mixte de dégrossissage et de finition.

Dans la fabrication en série, en façonnant les plans des corps sur des fraiseuses genre raboteuse il est avantageux de procéder par « retournement ». Cette méthode consiste à changer sur le montage la position de chaque pièce du lot de façon à rendre accessible à l'usinage les plans opposés (haut, bas, côtés, faces).

Cette structure de la phase améliore l'utilisation des têtes de fraisage, de la longueur de course et de la surface de la table, permettant de dégager après chaque course une pièce dont tous les plans sont finis. De plus, cela élimine la remise à la cote de la machine et supprime, lors d'un travail par lots, l'accumulation des ébauches partiellement usinées.

Le procédé d'usinage par retournement est le plus avantageux pour le travail de l'ensemble corps-couvercle d'une construction démontable. Une étude judicieuse de l'usinage d'un groupe de deux pièces avec retournement permet d'obtenir, après chaque course de la table, un ensemble fini, prêt pour l'usinage ultérieur.

Parfois il est possible d'établir des réglages prévoyant le retournement de deux ou trois pièces différentes.

Les plans de gros corps sont usinés sur des fraiseuses à portique à unités de fraisage; ce portique se déplace par rapport à l'ébauche abloquée sur un plateau fixe.

Les surfaces d'appui de petites pièces sont façonnées sur des rectifieuses verticales à dégrossir.

La finition des plans se fait par a) rectification sur des rectifieuses planes; b) rabotage fin à l'outil pelle; c) fraisage fin; d) grattage.

Le *façonnage des trous principaux* des corps se fait, suivant le volume de la production, sur des aléseuses horizontales universelles ou sur des machines multibroches à unités d'usinage formant parfois des machines-transferts.

Les cotes diamétrales des trous sont réalisées avec des outils prévus pour l'exécution d'une cote définie (alésoirs, têtes d'alésage et unités d'alésage) montés en nombre imposé sur des mandrins d'alésage ou des barres d'alésage, ainsi qu'avec un seul outil mis à la cote avec un micromètre.

La précision des entraxes, le parallélisme et la perpendicularité des axes ainsi que d'autres spécifications des positions des trous s'obtiennent par deux procédés: 1) exécution des trous avec guidage de l'outil dans un montage; 2) exécution des trous sans guidage de l'outil mais avec la mise en œuvre des modes d'établissement universels de la position des outils.

Dans la fabrication en grandes séries et de masse, les trous principaux des corps sont percés sur des machines multibroches, les opérations étant établies suivant un cycle simultané ou mixte pour le travail simultané de deux ou de trois côtés de l'ébauche. La position imposée des trous est assurée par la disposition correspondante des broches dans les unités d'usinage, chacune étant liée à la barre d'alésage orientée par les guides du montage. Lors du travail sur des machines à unités d'usinage, il est avantageux de diviser le dégrossissage et la finition en deux opérations exécutées sur deux machines à unités d'usinage formant machine-transfert ou en deux reprises réalisées en deux indexages sur une machine à unités d'usinage d'une ligne continue. Parfois, dans la fabrication en grandes séries, pour assurer la charge des machines, on est obligé d'établir des mises à la cote permettant, avec une perte de temps insignifiante pour la remise à la cote, d'effectuer les deux opérations sur la même machine.

Les trous principaux de petits corps peuvent être percés sur des perceuses verticales avec montages et unités d'usinage multibroches ou sur des perceuses radiales avec montages pivotants.

Dans la fabrication sérielle, les trous principaux sont faits sur des aléseuses horizontales universelles avec guidage de l'outil par le montage. Les trous sont percés par une broche raccordée successivement aux barres d'alésage dont chacune porte un outil pour l'exécution du trou qui correspond à son axe. Les entraxes et le parallélisme des axes sont assurés par le déplacement de la table et le guidage de la barre d'alésage suivant le montage. La perpendicularité des axes des trous est obtenue par le pivotement de la table.

Pour accroître la productivité du travail sur les aléseuses, on fait appel à des têtes d'alésage multibroches pour la réalisation simultanée de plusieurs trous aux axes parallèles. Ces têtes reçoivent le mouvement depuis la broche de la machine, et leurs broches, réparties suivant les trous à aléser, transmettent le couple moteur aux barres d'alésage.

Dans tous les cas d'orientation de l'outil suivant le guide du montage, les corps usinés sur des machines à unités et des aléseuses universelles sont mis en place par des chevilles de calage suivant deux trous de tenue pratiqués spécialement dans la surface plane de la base.

L'exécution des trous sans guidage de l'outil caractérise une fabrication unitaire ou en petite série, lorsque l'application des montages ne présente aucun avantage. Les pièces subissent alors l'alésage après traçage. Pour réaliser la mise en place d'une ébauche sur la table de l'aléseuse horizontale, il faut :

1) mettre en position et dégauchir le corps sur la table de la machine en assurant le parallélisme des axes des trous tracés et de l'axe de la broche ;

2) confondre l'axe de la broche avec celui du premier trou à aléser ;

3) exécuter le trou suivant le premier axe ;

4) déplacer la table portant la pièce à la distance de l'entraxe imposée jusqu'à l'axe du deuxième trou ;

5) exécuter le trou suivant le deuxième axe, etc.

La perpendicularité des axes des trous alésés est assurée par le pivotement de la table portant l'ébauche.

Le réglage de la broche pour l'exécution des trous situés à une hauteur différente se fait par déplacement de la boîte de la broche dans le sens de la colonne de la machine. La précision de lecture des déplacements de la table ou de la boîte de la broche est fonction de la tolérance imposée sur les entraxes.

Une tolérance de 0,1 à 0,2 mm est assurée par lecture des déplacements sur le vernier de la machine ; des tolérances plus rigoureuses

sont respectées en couplant à la chaîne, assurant la lecture des déplacements dans le sens des axes des coordonnées, des appareils plus précis, généralement des comparateurs.

Outre les aléseuses à table mobile, en construction mécanique lourde on utilise des aléseuses à table fixe dont tous les mouvements de travail sont exécutés par la colonne de la broche.

L'usinage des corps lourds sur des machines à table fixe exige des frais de temps importants, surtout de temps secondaire qui constitue dans les cas défavorables de 60 à 80 % du temps d'usinage par pièce. Lorsqu'il faut passer à l'alésage d'un trou ayant un autre axe, il faut déplacer la colonne de la broche, le montant arrière de la lunette et la barre d'alésage en position du nouvel axe tout en assurant une grande précision des déplacements; le travail est ainsi rendu plus compliqué.

Après chaque déplacement de la barre d'alésage il faut vérifier sa coaxialité avec la broche, la valeur de l'entraxe et le parallélisme avec sa position précédente. La perpendicularité des axes est réalisée par une nouvelle mise en place du corps et par son dégauchissage par rapport à l'axe de la broche.

Les opérations d'alésage exécutées sur ces machines se font généralement en une mise en place sans diviser le travail en dégrossissage et finition; ce n'est qu'après avoir exécuté toutes les reprises et obtenu les cotes et les états de surface imposés qu'on aborde l'usinage du trou sur l'axe suivant.

Pour économiser le temps, il est préférable d'employer un mandrin court sans appui secondaire, au lieu d'une barre d'alésage longue qui implique une vérification compliquée de la mise en place sur le palier de la lunette arrière.

Pour utiliser un mandrin d'alésage, il faut que le rapport entre sa longueur l et son diamètre d ne dépasse pas les limites $l \leqslant 5$ à $6d$.

La mesure des trous alésés se fait sans dégager la barre d'alésage, en mettant en œuvre les instruments montés sur la barre ou permettant de la contourner.

Les trous principaux de gros corps, fabriqués même en petites séries, peuvent être percés avec des têtes d'alésage portatives placées près de la pièce à façonner sur le même dallage; une telle tête permet de pratiquer simultanément plusieurs trous; dans ce cas on obtient une sorte de machine à unités d'usinage qui réduit nettement la quantité de travail. Les barres d'alésage sont orientées par les bagues des montants universels posés sur le dallage et formant une espèce de montage d'alésage.

Les trous de boulonnerie et autres se font en fonction du volume de fabrication sur des machines à unités d'usinage multibroches des machines-transferts ou des lignes continues, sur des perceuses multibroches ou sur des perceuses verticales avec utilisation des

têtes multibroches, sur des perceuses radiales munies de montages pivotants ou de montages simples.

Les *particularités du contrôle* des corps consistent à vérifier a) la planéité et les positions relatives des plans constituant les surfaces d'assemblage; b) les formes géométriques des trous essentiels; c) la coaxialité des trous; d) le parallélisme des axes des trous principaux aux surfaces d'assemblage; e) le parallélisme des axes

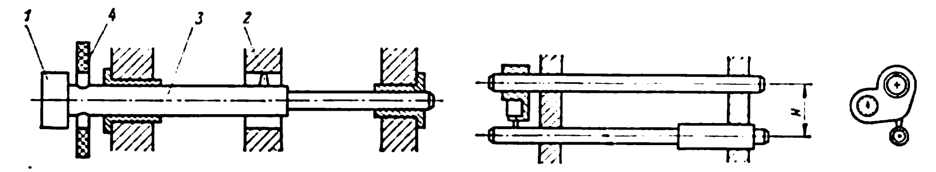


Fig. 275. Vérification de la coaxialité des trous:
1 — comparateur; 2 — jauge associée au comparateur; 3 — mandrin vérificateur; 4 — volant pour pivoter le mandrin vérificateur

Fig. 276. Vérification de l'entraxe et du parallélisme des axes des trous

des trous principaux et des entraxes; f) la perpendicularité des axes des trous (si des trous aux axes perpendiculaires existent); g) la perpendicularité des faces aux axes des trous.

La planitude des surfaces est généralement vérifiée au réglet étalon. La vérification des positions relatives des plans qui forment la surface de montage se fait sur des marbres spéciaux à la peinture (8 à 12 taches sur un carré de 25 × 25 mm) ou à la jauge d'épaisseur.

La forme géométrique des trous principaux est contrôlée soit à la jauge pour mesure des alésages au comparateur, soit au rotamètre pneumatique comportant un bouchon calibré spécial.

La coaxialité des trous est vérifiée généralement avec des mandrins de contrôle engagés directement dans les trous ou dans les bagues si les diamètres des trous sont grands. La figure 275 schématise un contrôle de trois trous disposés sur le même axe; le défaut de coaxialité du trou central est établi par le comparateur *1* lié par une tige et un système de leviers à la jauge d'épaisseur *2*; pour l'obtenir, on fait pivoter le mandrin de contrôle *3* à l'aide du volant *4*. Pour de gros corps la vérification se fait par des procédés optiques.

Le parallélisme entre les axes des trous principaux et les surfaces de montage et la distance imposée de l'axe à la surface de montage sont vérifiés en mesurant les distances de l'axe des trous aux extrémités du corps jusqu'au plan de référence.

Le parallélisme des axes des trous principaux et l'entraxe *H* sont vérifiés au mandrin de contrôle qui matérialise les axes, et au comparateur (fig. 276).

La perpendicularité des axes des trous peut être vérifiée également suivant le schéma représenté sur la figure 277. La queue calibrée du disque *1* est engagée dans un des trous, alors que l'autre trou reçoit un réglet *2*; la lumière entre le disque et le réglet indique

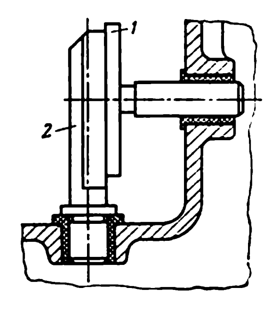


Fig. 277. Vérification de la perpendicularité des axes des trous

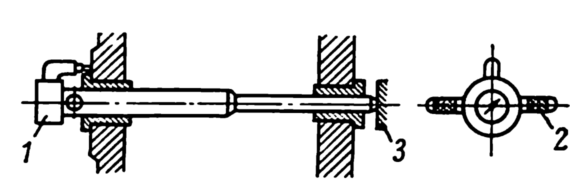


Fig. 278. Vérification de la perpendicularité d'une face par rapport à l'axe d'un trou:
1 — comparateur; *2* — poignée pour pivoter le mandrin; *3* — butée

la valeur du défaut de perpendicularité. Ce même schéma peut s'employer pour vérifier à l'aide de deux comparateurs montés sur le réglet.

La perpendicularité des faces aux trous est vérifiée à l'aide d'un dispositif à comparateur et d'un mandrin de contrôle matérialisant l'axe, qui s'engage dans le trou dans lequel il ne peut pas se déplacer dans le sens axial (fig. 278).

§ 2. Gammes d'assemblage des ensembles types

Montage des ensembles comportant des paliers: montage à force des coussinets dans le corps, vérification du montage à force et usinage ultérieur des coussinets; montage des coussinets dans les logements du corps et du couvercle; pose de l'arbre sur les paliers, travaux d'ajustage, serrage des paliers; particularités du montage des coussinets à parois minces; vérification du montage des paliers.

Montage des ensembles à roulements: ajustement des roulements sur les arbres; vérification des jeux radial et axial, qualité de l'adhérence aux rebords et aux repos. Montage à force d'un roulement dans le trou d'un corps; montage des roulements à rouleaux coniques; particularités de montage des roulements à aiguille.

Montage des conjugaisons à surfaces planes.

Montage des engrenages et des vis hélicoïdales; ajustement des pignons sur les arbres; mise en position des arbres portant des engrenages dans un corps; réglage de l'engrènement des transmissions coniques; montage des roues hélicoïdales; essais des engrenages et des transmissions hélicoïdales.

Montages des ensembles comportant des paliers

Coussinets. Le montage des coussinets dans un corps se fait soit par emmanchement à force à froid, soit en chauffant le corps ou en refroidissant le coussinet.

Pour prévenir le gauchissement, le grippage et la déformation irrégulière, le centrage des coussinets par rapport aux trous doit être précis. Pour l'obtenir, on utilise des dispositifs spéciaux pour l'emmanchement à force des coussinets. La figure 279 représente un de tels dispositifs. Le coussinet *1* est engagé sur la partie rectifiée du mandrin *2*; le mandrin *2* est centré par la tige *3* qui passe par le trou du corps *4*, dans lequel le coussinet est monté à force. Ce dispositif assure un très bon ajustement du coussinet.

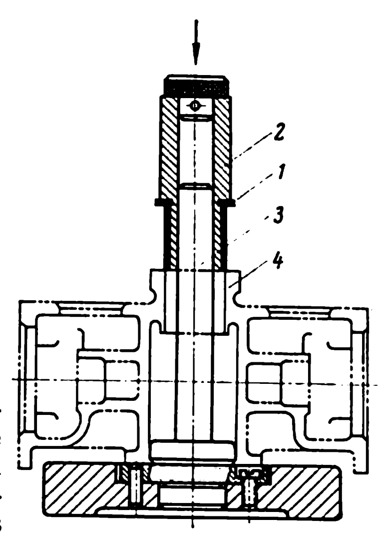


Fig. 279. Dispositif pour le montage à force d'un coussinet sur le corps

Lors du montage du coussinet avec chauffage de la pièce femelle ou avec refroidissement du coussinet, l'assemblage doit s'opérer le plus rapidement possible, car au cours de l'assemblage les dimensions des pièces, et surtout celles du coussinet, se modifient sous l'effet des déformations thermiques, rendant ainsi plus difficile l'ajustement de la bague.

La théorie du graissage nous indique que les conditions les plus favorables au fonctionnement d'un couple conjugué (portée et coussinet) sont celles d'un film d'huile régulier. Ces conditions sont assurées par l'usinage rigoureux de la portée et du coussinet et l'ajustement correct de ce dernier. La déformation du coussinet résultant de son montage à force, et notamment son ovalisation, sa conicité et autres défauts de forme du trou du coussinet, ainsi que le gauchissement de l'axe du coussinet ou les défauts locaux des surfaces de frottement du coussinet et de l'arbre créent des discontinuités dans le film d'huile, provoquent un frottement à sec local et donc une usure accélérée des éléments conjugués. C'est pourquoi avant et après le montage à force les coussinets doivent être vérifiés minutieusement. Avant de procéder à l'emmanchement, les surfaces extérieure et intérieure sont révisées avec soin; les défauts locaux

ainsi révélés sont corrigés si leur caractère le permet. Sinon, la pièce est rebutée. Après le montage à force, la forme géométrique des surfaces intérieures du coussinet est vérifiée au comparateur dans deux orientations respectivement perpendiculaires et au moins dans trois sections suivant la longueur.

Les coussinets bien montés dans un corps sont bloqués, pour parer à leur pivotement, de la façon figurée sur le dessin. Lors du blocage par une cheville suivant la surface cylindrique, le trou dans le corps prévu pour recevoir la cheville peut être percé au cours de l'usinage du corps, tandis que celui dans le coussinet seulement après son montage à force. Lors du blocage par une cheville ou une vis, les trous dans le flasque du coussinet et le corps sont percés après l'emmanchement et la vérification d'ajustement du coussinet. S'il s'agit d'une cheville, elle est engagée à force avec serrage dans le trou, son extrémité est aplatie puis limée au ras de la face. Pour prévenir le desserrage spontané lors de la fixation avec une vis, le filetage doit être serré et la tête de la vis noyée par rapport à la face à 0,2 ou 0,3 mm.

La finition du trou d'un coussinet se fait après blocage. Elle s'opère par alésage, tournage fin, brochage où calibrage à la bille ou au poinçon. Après la finition, les arêtes vives sont émoussées avec un grattoir.

La coaxialité des trous des coussinets emmanchés dans des parois différentes est vérifiée de la même façon que celle des trous dans les corps.

Les *coussinets à parois épaisses* des paliers sont définis par la relation :

$$K = \frac{S}{D} = 0{,}065 \text{ à } 0{,}095,$$

où S est l'épaisseur de la paroi du coussinet non régulé;

D, le diamètre extérieur du coussinet.

La pose des coussinets dans un corps ou un couvercle se fait soit avec un faible jeu, de l'ordre de 20 à 60 μ, soit avec un ajustement glissant. Pour prévenir l'endommagement des coussinets lors de leur montage sur les logements, on place sur les deux surfaces de joints des plaquettes en bois ou métalliques et on y porte de faibles coups de marteau.

Le coussinet fonctionne normalement lorsque sa surface extérieure adhère à la surface du logement sur toute la surface de contact; s'il n'en est pas ainsi, le coussinet reçoit sous l'action des charges des déformations périodiques qui peuvent entraîner la destruction de la couche d'alliage antifriction régulée sur la surface extérieure du coussinet. Une mauvaise adhérence compromet également l'échange thermique entre le coussinet et le corps. C'est pourquoi les coussinets sont soigneusement triés suivant les logements

des corps, ces logements étant au besoin partiellement grattés. Les chapeaux des paliers sont choisis d'une manière analogue ; ils doivent se poser sur les goujons sans jeu ; le meilleur ajustement est celui qui, pour le montage, impose de porter verticalement de faibles coups de marteau de bois sur le centre du chapeau pour prévenir son gauchissement. Lors du montage des paliers, les joints des chapeaux et du corps ainsi que ceux des coussinets doivent adhérer sans jeu. Si les joints sont placés entre le chapeau et le corps, il faut veiller à ce qu'ils soient lisses et propres.

La coaxialité des paliers prévus pour des arbres à portées multiples est vérifiée à l'aide de mandrins de contrôle et d'autres méthodes analogues. Lors du montage de gros corps, la vérification de la coaxialité des trous se fait à l'aide d'un fil d'acier et d'une jauge pour mesurer les alésages ou par la méthode optique, lorsque la vérification se fait avec un collimateur et une lunette.

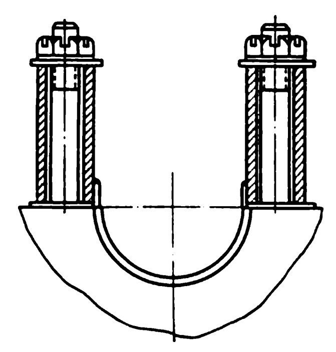


Fig. 280. Blocage des coussinets par des serres

Le corps, les coussinets et les chapeaux sont marqués pour assurer lors des travaux ultérieurs le montage des pièces accouplées.

La pose de l'arbre sur les paliers débute par la vérification de l'adhérence des portées de l'arbre d'abord aux coussinets inférieurs, puis aux coussinets supérieurs. Les coussinets inférieurs sont posés sur le corps et bloqués par des serres (fig. 280). Ensuite on enduit les portées de l'arbre d'une mince couche de peinture. L'arbre est posé de façon que toutes les portées soient simultanément en contact avec les coussinets. Lorsque le poids des arbres est important, ils sont placés à l'aide d'une grue à laquelle l'arbre est rattaché horizontalement. La position de l'arbre est vérifiée avec un niveau. Une fois posé sur les paliers, l'arbre est tourné à la main deux ou trois fois, puis relevé. Une distribution régulière des taches de peinture sur toute la surface des coussinets témoigne d'une bonne adhérence des portées. Ensuite les coussinets sont essuyés, les portées de nouveau enduites de peinture et l'arbre monté sur les paliers ; on dégage les serres et pose les chapeaux des paliers avec les coussinets supérieurs en veillant à ce que les marques des éléments assemblés coïncident. S'il y a des joints on les dispose de façon que les plus gros adhèrent au corps, et les plus minces, au chapeau (l'épaisseur des joints d'un jeu varie généralement de 0,1 à 0,8 mm) ; une telle disposition des joints rend plus rapide la formation du film d'huile après l'assemblage ou le resserrage des paliers.

Après la pose des chapeaux on procède au serrage des écrous successivement sur chaque palier depuis le milieu vers les extrémités de l'arbre; après le serrage des écrous d'un palier l'arbre est tourné deux ou trois fois à l'aide d'un levier, les écrous des autres paliers étant desserrés. Ensuite les chapeaux sont déposés pour vérifier l'adhérence des portées aux coussinets supérieurs d'après les taches de peinture sur ces coussinets.

L'ajustement des coussinets se fait par grattage effectué sur un montage (fig. 281). Le grattage se poursuit jusqu'à ce qu'au moins 80 % de la surface soit couverte par des empreintes régulièrement réparties; l'ajustage est acceptable lorsque chaque carré de 25 × 25 mm compte 18 à 20 taches.

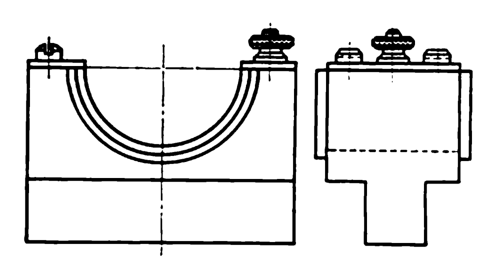


Fig. 281. Montage de grattage d'un coussinet de palier

Une fois l'ajustement fini, les portées et les coussinets sont lavés, les trous d'amenée de lubrifiant nettoyés à la brosse métallique plongée dans l'huile et les éléments conjugués soufflés à l'air comprimé et graissés au pinceau. Ensuite l'arbre est posé définitivement et tous les écrous sont serrés et goupillés; le serrage s'opère par couples à partir des paliers du milieu vers les paliers extrêmes en observant les règles de serrage des écrous (voir fig. 148).

Les *coussinets à parois minces* ($K = \frac{S}{D} = 0{,}025$ à $0{,}045$) se font interchangeables; leurs logements sont usinés avec une précision élevée: la conicité varie de 10 à 15 μ pour une longueur de 100 mm, et l'ovalisation pas plus grande que 15 à 20 μ. C'est pourquoi l'ajustement des coussinets aux logements ne se fait pas. On les choisit en vérifiant par contact à l'aide d'un colorant leur adhérence aux logements.

Le montage des coussinets à parois minces se singularise par un ajustement avec serrage; les bords du coussinet serré à la surface du logement dépassent le plan de joint de la valeur Δh calculée suivant la formule:

$$\Delta h = \frac{\pi (d_{cous} - d_c)}{2 \cdot 2} = \frac{\pi i}{4}, \qquad (178)$$

où d_c est le diamètre du trou dans le corps;

d_{cous}, le diamètre extérieur du coussinet;

i, le serrage d'ajustement du coussinet sur le corps.

D'habitude, les bords du coussinet dépassent de 50 à 100 μ le plan de joint. Lorsque les écrous sont serrés, cette saillie

produit un ajustement pressé. Dans ces conditions, la vérification de la hauteur des coussinets à parois minces acquiert une importance particulière. Si cette hauteur est insuffisante, elle n'assure pas le serrage et l'adhérence voulus du coussinet à la surface du logement, altérant ainsi les échanges thermiques entre le coussinet et le corps et dégradant les conditions de travail de la couche d'antifriction. Une hauteur exagérée de la saillie des bords provoque leur déformation (fig. 282) et augmente la pression spécifique à la surface du coussinet, ce qui peut entraîner sa surchauffe et la fusion de la couche d'antifriction.

La hauteur des coussinets à parois minces est vérifiée sur un montage spécial (fig. 283) comportant un logement amovible *1* dans

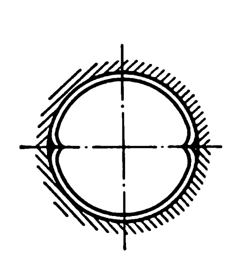


Fig. 282. Déformation des bords des coussinets par suite d'une hauteur exagérée

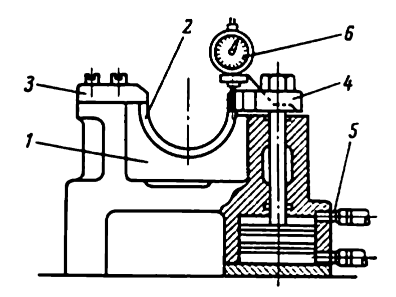


Fig. 283. Montage de vérification de la hauteur des coussinets à parois minces

lequel on pose le coussinet à vérifier *2*; un des bords du coussinet bute contre la plaque *3*, alors que l'autre est serré par la plaque *4* de serrage pneumatique *5* avec une force égale à la force de serrage des écrous du palier; la mesure se fait au comparateur *6* fixé au corps du montage; le réglage du comparateur se fait suivant un étalon.

Le contrôle d'un arbre monté sur des paliers se fait par rotation à la main à l'aide d'un levier de longueur définie. Si l'arbre se déplace avec difficulté, on desserre successivement les écrous des chapeaux pour définir le palier qui empêche la rotation, après quoi on y place un joint de réglage supplémentaire. Le réglage par diminution du serrage des écrous est à prohiber. La valeur du jeu radial peut être établie en faisant tourner l'arbre muni d'une plaquette de laiton calibrée placée entre la portée et le coussinet supérieur.

Les jeux axiaux sont vérifiés avec une jauge d'épaisseur ou un comparateur lors des déplacements maximaux de l'arbre. Généralement la valeur des jeux axiaux varie de 0,1 à 0,8 mm.

Montage des ensembles munis de roulements

Lors d'un ajustement avec serrage, le roulement soigneusement lavé est chauffé dans un bain d'huile et posé sur l'arbre. L'augmentation du diamètre de la bague intérieure qu'on s'efforce d'obtenir par échauffement doit correspondre à la valeur du serrage; la température d'échauffement est calculée suivant la formule (103).

La température courante d'échauffement se situe entre 60 et 100°; sa durée est de 15 à 20 mn. Il se fait d'habitude dans des bains d'huile à chauffage électrique; la température requise est définie par un thermomètre ou un couple thermo-électrique et peut être maintenue automatiquement.

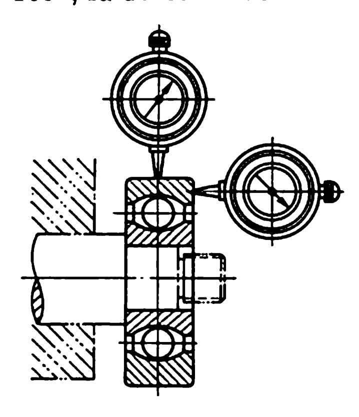


Fig. 284. Montage pour vérifier les jeux radial et axial d'un roulement posé à force sur un arbre

Pour prévenir le gauchissement des bagues et pour ne pas endommager les chemins de roulement et les billes lors de l'ajustement d'un roulement sur un arbre, on utilise des mandrins; le roulement est alors poussé jusqu'à son emplacement par de faibles coups de marteau portés sur le mandrin qui bute contre la bague intérieure. On recourt également aux divers montages pour la pose à force.

La qualité d'un ajustement est vérifiée par rotation à la main qui doit être régulière, sans grippage; les jeux radial et axial sont définis à la main par balancement. Au besoin, la vérification des jeux peut se faire sur un montage muni de comparateurs (fig. 284). Si l'arbre comporte des rebords ou des épaulements, on vérifie à la jauge la qualité de leur contact avec la face de la bague; parfois on admet un jeu de 50 μ sur un arc ne dépassant pas 0,4 de la longueur de la circonférence de l'arbre.

Le montage à force d'un roulement dans un trou de corps est réalisé d'une façon analogue à celui d'un roulement sur un arbre; à cet effet on chauffe non pas le roulement mais la pièce femelle et on utilise un mandrin appliqué sur la bague extérieure du roulement; lorsque l'échauffement de la pièce femelle est difficile à réaliser, comme dans le cas d'un montage des roulements dans un gros corps, on procède au refroidissement des roulements.

Le montage des roulements à rouleaux coniques se fait séparément, la bague intérieure avec les rouleaux et la cage étant montée à force sur l'arbre et la bague extérieure, sur le corps. Le réglage du

jeu radial d'un tel roulement est réalisé par déplacement radial de la bague extérieure à la distance c (fig. 285). Les relations entre le jeu radial e, le jeu dans le sens de la pression λ et le déplacement axial de la bague c sont définies par les formules suivantes:

$$e = c \operatorname{tg} \beta,$$
$$\lambda = c \sin \beta.$$

En pratique, le réglage du jeu se fait à l'aide de joints, d'une vis ou d'un écrou de réglage.

Le démontage des roulements s'effectue sous une presse ou à l'aide d'extracteurs spéciaux.

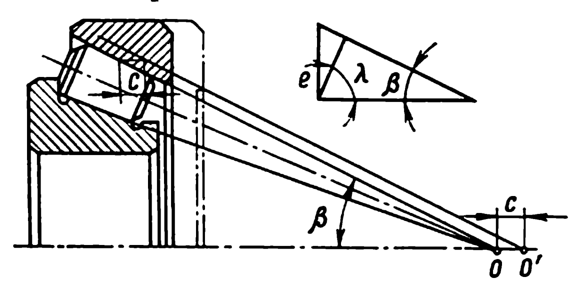


Fig. 285. Réglage du jeu radial d'un roulement à rouleaux coniques

Le montage d'un roulement à aiguille présente certaines particularités; ses surfaces sollicitées sont la surface de l'arbre et la surface intérieure de la pièce qui lui est conjuguée. Pour prévenir

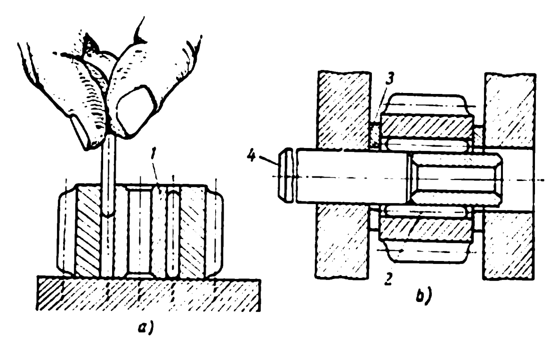


Fig. 286. Assemblage d'un roulement à aiguilles à l'aide d'un arbre de montage: *a* — pose des aiguilles; *b* — pose de l'arbre

le gauchissement, les aiguilles du roulement sont disposées de façon que le jeu total suivant la circonférence primitive varie de 1,5 à 2 mm. Le jeu radial est à peu près le même que celui dans les paliers de glissement de même diamètre; pour la surface de roulement des

arbres dont les diamètres varient de 25 à 100 mm, les jeux radiaux se situent entre 20 et 130 μ. Le jeu entre la face des aiguilles et les bagues de butée est compris généralement entre 0,1 et 0,2 mm.

La pose des aiguilles dans le trou de la pièce femelle se fait à l'aide d'un arbre de montage (fig. 286) dont le diamètre est inférieur de 0,1 à 0,2 mm à celui de l'arbre de travail. Les surfaces du trou et de l'arbre de montage sont recouvertes d'une mince couche de graisse consistante qui retient les aiguilles lors du montage. Les aiguilles *2* sont posées successivement par deux ou trois, la dernière ne devant présenter aucune difficulté pour être engagée dans le roulement. Ensuite on met les bagues de butée *3* et on introduit l'arbre de travail *4* qui chasse l'arbre de montage. L'ensemble ainsi monté est vérifié à la rotation qui doit être exempte de grippage.

Montage des conjugaisons à surfaces planes

Les positions relatives des pièces conjuguées suivant des surfaces planes sont généralement définies par certains éléments de construction des pièces assemblées, dont les rebords de centrage, les plans de guidage, les clavettes, etc. Il arrive pourtant que les positions relatives des surfaces actives de la pièce posée et de la pièce de départ ne puissent pas être assurées par la gamme de fabrication avec une précision suffisante ; il en est ainsi notamment lors de la coordination des surfaces actives de la pièce posée suivant deux plans perpendiculaires. Dans ce cas, le montage se fait avec dégauchissage de la pièce montée suivant la pièce de départ.

Dans la plupart des cas le dégauchissage peut se faire aux dépens des jeux entre les trous de fixation et les boulons, vis ou goujons; le serrage définitif des écrous s'effectue après dégauchissage. Ensuite vient le perçage et l'alésage des trous prévus pour les chevilles de calage qui fixent la position vérifiée de la pièce. On utilise généralement deux chevilles; une cheville suffit lorsqu'il y a un rebord de centrage. Dans des conjugaisons susceptibles de démontages fréquents on prévoit deux ajustements des chevilles, avec serrage pour la pièce de départ, et avec jeu pour la pièce posée.

Le réglage éventuel de la position de la pièce montée, c'est-à-dire son déplacement par rapport à la pièce de départ, est limité par le jeu entre la tige du boulon, de la vis ou du goujon et le trou ; lorsque la fixation se fait par plusieurs boulons ou vis, cette possibilité est moindre du fait de la tolérance sur les entraxes des éléments de fixation. Pour monter avec dégauchissage la pièce à poser on utilise donc un ou deux trous alors que les autres sont percés dans la pièce de départ après le dégauchissage. Les trous de la pièce à poser servent alors au guidage des outils.

La qualité de contact des abouts formés par les surfaces planes des pièces conjuguées est assurée par des joints. Il est d'usage d'employer des joints élastiques d'un matériau homogène (papier, carton, amiante, caoutchouc) ou combinés (métal à cœur d'amiante, amiante caoutchouté, etc.). Le défaut d'épaisseur admissible d'un joint ne doit pas dépasser 0,15 mm sur toute sa longueur. Parfois au lieu de joints on emploie des pâtes ou des mastics spéciaux.

Un bon contact peut être également obtenu sans utiliser des joints en effectuant un usinage minutieux des surfaces conjuguées, susceptible de maintenir les défauts de planéité dans les limites comprises entre 40 et 80 μ et d'assurer un état de surface de la 6e à la 7e classe. Dans ce cas il est avantageux d'employer une pâte spéciale [1] portée au pinceau en couche régulière sur la surface nettoyée puis décapée avec un solvant. Cette couche doit sécher à l'air pendant 10 à 15 mn avant la pose des pièces à assembler.

Lors de la fixation des pièces assemblées (couvercles, flasques, etc.), la qualité du contact est assurée par un serrage régulier des écrous effectué dans un ordre défini (voir fig. 148 et 149).

Montage des engrenages et des vis hélicoïdales

Le montage des *engrenages* consiste à 1) poser à force les pignons sur les arbres; 2) poser les arbres avec les pignons dans le corps et 3) régler la prise des pignons.

L'ajustement des pignons sur les arbres se fait généralement avec un faible serrage, et parfois même avec jeu, car un serrage important compromet le profil des dents de la roue, perturbant ainsi le fonctionnement de l'engrenage. Dans un moteur à combustion interne, l'ajustement des pignons se fait, notamment, avec un serrage de 23 à 35 μ ou avec un jeu de 9 à 25 μ.

Un pignon posé sur un arbre ne doit pas balancer et doit assurer un bon contact avec le rebord de butée; il ne faut pas que ses jeux axial et radial soient supérieurs aux valeurs établies par les tolérances. La vérification du pignon au balancement se fait en portant de faibles coups de marteau sur le pignon emmanché; pour ne pas endommager le pignon, le marteau doit être « doux », c'est-à-dire être nettement moins dur que les pignons. La qualité de contact avec le rebord de butée est vérifiée à la jauge d'épaisseur.

Le contrôle du faux-rond de rotation et du déplacement axial s'effectue sur un montage à comparateur. Le faux-rond est vérifié sur des vés avec positionnement suivant les portées de l'arbre

[1] La composition de la pâte suivant le poids: 54 % de l'alcool dénaturé, 36 % de shellac, 6 % de graphite, 3 % d'huile de ricin et 1 % d'ocre.

(fig. 287) ; la hauteur d'un des vés (celui de gauche généralement) est réglable, permettant ainsi d'assurer une mise en place parallèle de l'arbre par rapport au plan du marbre de montage ; entre les dents du pignon on place un calibre cylindrique et on note la lecture de l'aiguille du comparateur ; en tournant l'arbre et en replaçant le calibre entre toutes les deux dents, on relève la différence entre les lectures du comparateur, caractéristique du faux-rond de la circonférence primitive ; d'habitude le faux-rond de ce type varie de 25 à 75 μ. Quant au déplacement axial, il est plus aisé de le mesurer entre pointes (fig. 288) ; sa valeur admissible varie de 0,10 à 0,15 mm. Lorsque le faux-rond ou le déplacement dépasse les limites imposées par les spécifications, le pignon est déposé puis monté de nouveau à force, après l'avoir tourné d'un certain angle.

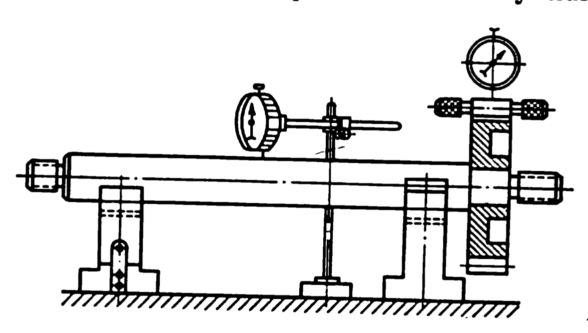


Fig. 287. Contrôle de faux-rond d'un pignon posé sur un arbre

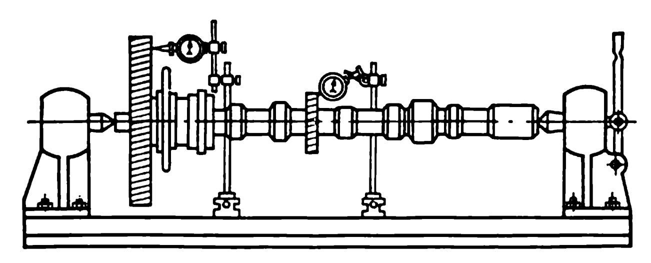


Fig. 288. Vérification du déplacement axial des faces des pignons montés à force sur un arbre

La vérification de la qualité d'ajustement se fait sur un montage à comparateur comportant un pignon étalon ; le procédé est analogue à celui de la vérification de la précision de fabrication des pignons ; la portée de l'arbre est alors posée sur la bague et son extrémité est fixée par la pointe du montage.

Lors de la pose d'un pignon à flasque sur un arbre, on le fixe d'abord par trois boulons provisoires d'un diamètre plus petit que celui des boulons de fixation. Le pignon est alors vérifié au faux-rond et, après dégauchissage, les boulons provisoires sont serrés. Ensuite les autres trous dans le pignon et le flasque d'arbre assemblés sont alésés suivant un montage de perçage ; enfin, on engage dans ces trous des boulons de fixation et on serre les écrous. Après

avoir retiré les trois boulons provisoires, on procède à l'alésage des trous ainsi libérés et on pose les boulons de fixation.

Les écrous sont généralement serrés avec une clé dynamométrique pour créer sur les surfaces conjuguées une force de frottement dont le moment doit être supérieur au moment de torsion transmis par l'arbre à l'aide du pignon. Après le montage définitif du pignon sur l'arbre, on vérifie encore une fois le faux-rond et le déplacement axial.

Si les tolérances imposées sont observées pour tous les éléments de l'ensemble à monter, l'engrenage satisfait généralement aux prescriptions fonctionnelles. Pourtant, même dans ces conditions, des défauts d'engrenage peuvent apparaître par suite d'une combinaison défavorable des écarts, dont chacun varie dans les limites imposées. Les défauts d'engrenage les plus typiques sont: a) jeu exagéré entre les dents sur toute la couronne produit par un écart maximal positif de l'entraxe des pignons et un écart maximal négatif de l'épaisseur des dents d'un pignon ; b) jeu insuffisant entre les dents sur toute la couronne, l'entraxe ayant une valeur limite inférieure et l'épaisseur des dents, une valeur limite supérieure; c) jeu irrégulier entre les dents résultant de l'excentricité de la circonférence primitive par rapport à l'axe de rotation et de l'épaisseur irrégulière des dents; d) déplacement axial des faces d'un pignon lors de l'engrenage résultant du gauchissement de l'axe du trou du pignon et de l'axe du logement du corps.

Ces défauts peuvent être corrigés par le choix approprié des pignons, le remplacement de la bague ou d'un des pignons, le remplacement ou l'alésage de la bague ou du palier dans le corps et par des mesures analogues.

Lorsque l'engrenage comporte des roues de module important, le jeu peut être mesuré en plaçant entre les dents des fils de plomb et en relevant ensuite au palmer l'épaisseur des fils aplatis.

On peut également noter au comparateur le jeu latéral de l'engrenage en mesurant l'angle de pivotement d'un des pignons, l'autre étant bloqué. Par ailleurs, on utilise à cet effet des montages spéciaux.

La qualité de l'engrenage peut être vérifiée également par contact à l'aide d'un colorant suivant les normes homologuées de contact des pignons accouplés. Ces normes indiquent que la rotation du pignon inférieur, couvert d'une mince couche de bleu d'azur, doit laisser des taches de colorant au milieu de la surface latérale des dents.

Lorsque les pignons coniques tournant sans charge sont vérifiés par contact à l'aide d'un colorant, la tache de contact doit se situer plus près de la tête mince de la dent, à 1,5 ou 3 mm du bord dans le sens de la longueur et à 0,4 ou 1 mm dans le sens de la hauteur.

Vu la déformation de la tête plus mince, lors du travail sous charge, la tache de contact se déplace vers l'extrémité épaisse de la dent assurant ainsi un meilleur contact des surfaces actives. Les normes imposées de contact des dentures coniques sont quelque peu inférieures à celles des roues cylindriques.

Lors de la pose des roues coniques, le jeu requis entre les dents est réalisé en réglant l'engrenage, c'est-à-dire en déplaçant soit les deux roues, soit l'une d'entre elles dans le sens axial. Le réglage se fait avec un jeu de joints ou par déplacement des bagues à l'aide d'écrous spéciaux.

L'épaisseur des joints en laiton ou en acier utilisés pour le réglage varie de 0,05 à 1,5 mm ; le jeu de joints est posé sous les plans d'appui des pignons ou des anneaux intermédiaires sur lesquels ces pignons reposent.

Le réglage des écrous se fait par leur rotation ; l'un des écrous est serré, alors que l'autre est desserré ; il en résulte que la bague déplace l'arbre avec le pignon dans le sens axial en l'éloignant ou l'approchant du pignon conjugué. Lorsque le jeu imposé est réalisé, l'ensemble est bloqué par ces mêmes écrous dans la position ainsi établie. On sait que le jeu C et la valeur du déplacement axial de la roue x pour un angle de pression φ et un angle primitif γ sont reliés par la relation suivante :

$$C = x\, 2 \sin\varphi \sin\gamma.$$

Pour simplifier le réglage, l'un des pignons est préalablement mis en position suivant la coordonnée imposée par le dessin, puis bloqué dans cette position ; le réglage du jeu se fait par déplacement axial de l'autre pignon.

Lorsque le déplacement axial du pignon modifie la position relative des autres éléments qui ne doit pas être perturbée, le réglage doit se faire de façon à ne pas modifier cette position.

A titre d'illustration, examinons l'établissement d'un jeu d'engrenages coniques à roulements à rouleaux coniques. Dans ce cas, le réglage du jeu doit se faire de façon que le jeu axial des roulements à rouleaux coniques reste constant quel que soit le déplacement axial du pignon mené *1* (fig. 289). Pour y parvenir on procède de la façon suivante. On règle d'abord le jeu axial des roulements à rouleaux coniques en modifiant la distance l entre les évidements des logements *2* et *3* des roulements à rouleaux ; ceci est obtenu par des jeux de joints *4* de différentes épaisseurs placés entre les flasques des logements et le corps ; les joints isolés sont enlevés ou ajoutés suivant la nécessité qu'il y a de diminuer ou d'augmenter le jeu axial des roulements. Après chaque changement du nombre de joints et le serrage des écrous, il importe de vérifier la rotation de l'arbre et son déplacement axial. Le jeu axial définitivement établi

du roulement à rouleaux doit rester constant lors du réglage ultérieur du jeu entre les pignons *1* et *5*, c'est-à-dire que la distance *l* obtenue entre les évidements des logements *2* et *3* des roulements à rouleaux ne doit pas changer au cours du déplacement axial du pignon *1*. Cette condition ne peut être observée que si l'épaisseur totale des joints *4* sous les flasques des deux logements reste constante tout au cours du réglage. C'est pourquoi en augmentant le jeu de l'engrenage, c'est-à-dire en déplaçant le pignon *1* à droite, les joints enlevés sous le flasque du logement *2* doivent être posés sous le flasque du logement *3*, et inversement, lors de la diminution du jeu de l'engrenage des pignons, les joints sous le flasque du logement *3* doivent être posés sous le flasque du logement *2*. C'est ainsi qu'on assure la constance de la cote *l* et donc, du jeu axial des roulements à rouleaux.

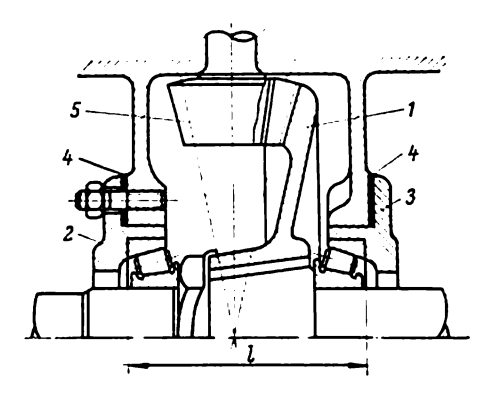


Fig. 289. Réglage du jeu d'un engrenage conique à rouleaux coniques

Les taches de contact, obtenues pendant la vérification des engrenages coniques à l'aide d'un colorant, permettent de juger si le jeu est admissible ou insuffisant, s'il existe un gauchissement des pignons ou d'autres défauts de montage. Les engrenages prévus pour des puissances élevées et de grandes vitesses, outre la vérification à l'aide d'un colorant, sont vérifiés au bruit, soit par une appréciation subjective soit à l'aide d'un sonomètre.

Le montage des ensembles à *vis sans fin* ne se distingue en rien du montage des ensembles à engrenages courants. En montant l'ensemble d'une transmission à vis sans fin on vérifie la position de la tache de contact. Le mauvais contact peut résulter d'une valeur incorrecte de l'entraxe ou de défauts de perpendicularité des axes de la roue à vis sans fin et de la vis ; il faut également vérifier la position de l'axe de la vis dans le plan médian de la roue et régler au besoin le couple en déplaçant dans le sens axial la roue et en la fixant dans la position établie.

Le jeu latéral de la transmission est contrôlé d'une façon analogue à celle des roues usuelles. La vérification au dynamomètre de la valeur du moment de torsion au cours de la rotation de la transmission et de la constance de ce moment au cours d'un tour de la roue permet de contrôler l'ajustement de la roue sur l'arbre, l'absence d'excentricité, ainsi que l'absence de faux-rond de la vis.

CHAPITRE VIII

Perspectives du développement de la technologie de la construction mécanique

§ 1. Moyens d'accroître la productivité du travail

Tendances essentielles de l'amélioration de la fabrication dans le but d'accroître la productivité du travail par le perfectionnement de l'interaction de l'exécution des ébauches et de leur usinage ultérieur, d'une part, et de l'usinage et de l'assemblage, de l'autre.

Augmentation de la productivité du travail par établissement des phases exécutées sur des machines à unités d'usinage; machines-transferts; machines universelles avec utilisation des montages assurant le chevauchement du temps de mise en place des ébauches; tours semi-automatiques à outils multiples; tours à recopier hydrauliques semi-automatiques rapides; machines universelles multibroches et à chariots multiples.

Augmentation de la productivité du travail par la mise en œuvre des outils complexes et la diminution de la course de l'outil.

Diminution du temps machine par modification des régimes d'usinage.

Moyens pour réduire le temps secondaire.

Production continue et automatisation de la fabrication en tant que moyens les plus efficaces pour accroître la productivité.

Moyens d'accroître la productivité de l'assemblage: différenciation des phases d'assemblage, concentration des reprises lors de l'établissement des phases d'assemblage, mécanisation des travaux d'ajustage et d'assemblage, mise en œuvre de l'interchangeabilité et de l'assemblage continu.

Assemblage continu et automatisation des travaux de montage en tant que procédés les plus efficaces pour augmenter la productivité et élever le niveau technologique à tous les échelons de la gamme de production.

En construction mécanique, les tendances technologiques essentielles pour accroître la productivité se fondent, entre autres, sur l'interaction des modes d'exécution des ébauches et de leur usinage ultérieur, ainsi que sur celle des modes d'usinage et d'assemblage.

On sait que les modes actuels d'obtention des pièces précises forgées et moulées permettent de réduire nettement le volume d'usinage des ébauches et d'appliquer les procédés productifs de fabrication. Plus l'exécution des ébauches est précise, plus elle est susceptible d'assurer une productivité élevée. Ainsi, l'estampage accroît nettement la productivité et la précision des ébauches par rapport au forgeage libre; il en est de même du moulage à la machine par rapport au moulage à la main, le moulage en coquille et la coulée en moules permanents par rapport au moulage en sable, la coulée sous pression par rapport à la coulée courante dans des moules permanents.

Par ailleurs, l'application de procédés plus productifs implique l'augmentation de la part des frais de main-d'œuvre indirecte nécessaire pour la réalisation de l'équipement et de l'appareillage. Mais dans les conditions d'une production définie, dictée essentiellement par le facteur quantitatif, c'est-à-dire par le programme imposé, la diminution des frais de main-d'œuvre directe couvre nettement les frais supplémentaires de main-d'œuvre indirecte. Lorsqu'il s'agit de confronter les frais généraux des mains-d'œuvre directe et indirecte, les gammes de fabrication des pièces mécaniques étant différentes, il convient de définir le prix de revient relatif à l'une et à l'autre variante.

On sait que le prix de revient d'une pièce P_p est défini par la somme de plusieurs termes [1]: a) frais d'exécution de l'ébauche $P_{éb}$; b) salaire de la main-d'œuvre directe affectée à l'usinage et aux autres modes de façonnage de l'ébauche S_u et c) frais d'atelier (généraux) d'usinage et d'autres modes de façonnage ($A_{éb}$).

Le prix de revient change suivant le mode d'exécution de l'ébauche; la gamme de fabrication et la quantité de travail nécessaire changent également, ainsi que les salaires de la main-d'œuvre directe et les frais d'atelier relatifs à l'usinage. C'est pourquoi l'application de la variante de la gamme d'usinage qui donne un prix de revient P''_p est justifiée, par rapport à la variante P'_p, lorsque $P''_p \leqslant P'_p$ ou:

$$P''_{éb} + S''_u + A''_{éb} \leqslant P'_{éb} + S'_u + A'_{éb}.$$

Pourtant, en calculant les frais d'atelier il faut tenir compte de l'utilisation ultérieure de l'équipement et de l'appareillage pour la fabrication répétée des produits considérés. Dans ces conditions, même si le volume du programme est relativement petit, il est logique de mettre en œuvre des procédés plus perfectionnés. Ainsi, pour la fabrication annuelle de 150 à 200 petites et moyennes pièces d'un poids inférieur à 100 kg, il est avantageux de recourir à l'estampage sur des matrices fixes. Le formage à la machine est pratiquement justifié pour des quantités bien inférieures à celles indiquées pour l'estampage. Le moulage en coquille élimine presque totalement l'ébarbage et par rapport au moulage en sable réduit de 60 à 70 % la quantité de travail d'usinage. Dans plusieurs cas, l'utilisation des constructions soudées au lieu des pièces pleines permet d'enregistrer une économie importante.

Ces données témoignent du fait que les modes d'exécution des ébauches et de leur usinage ultérieur doivent être étudiés dans leur ensemble compte tenu des frais des mains-d'œuvre directe et indirecte prévus pour l'exécution des ébauches et leur usinage ultérieur;

---

[1] Voir le chapitre VI, § 3, p. 381.

le choix des modes d'exécution des ébauches et de leur façonnage est guidé, certes, par les conditions de la production considérée.

L'analyse complexe des gammes de fabrication des pièces mécaniques est nécessaire également parce que l'une des tendances essentielles du développement de la technologie de la construction mécanique est l'établissement de lignes continues et de machines-transferts établies non seulement pour les opérations d'usinage et de traitement thermique, mais encore pour celle d'ébauchage et d'assemblage (moulage, estampage, soudage, etc.).

La valeur de la surépaisseur d'usinage est du même ordre d'importance que le choix du mode optimal d'exécution de l'ébauche. Les surépaisseurs établies par calcul sont enlevées généralement par un outil tranchant à chaque reprise, y compris le dégrossissage, en une passe. Dans certains cas, surtout lorsque le procédé d'exécution est précis, on se borne à l'usinage unitaire. Dans les deux cas, la quantité de travail du façonnage diminue nettement alors que la productivité augmente. D'autre part, la diminution de la profondeur de coupe, obtenue par calcul des surépaisseurs par rapport aux surépaisseurs données par les normes, permet d'effectuer l'usinage à des vitesses de coupe et des avances plus grandes, ce qui contribue également à élever la productivité.

Une analyse complexe des gammes d'usinage et d'assemblage est également susceptible de donner de meilleures solutions dans les conditions de production considérées. En pratique, le problème se réduit alors à un ordonnancement de la gamme de fabrication qui élimine ou au moins réduit nettement la quantité des travaux d'ajustage et d'achèvement nécessités par l'assemblage. Compte tenu de la grande quantité de travail imposée par les opérations d'ajustage et de la qualification élevée des ouvriers effectuant ces travaux, on peut affirmer que dans la majorité des cas les mesures dont l'objectif est d'éliminer ou de diminuer les travaux d'ajustage sont justifiées, car elles contribuent à diminuer la quantité de travail nécessaire pour l'exécution de la gamme de production et le prix de revient des produits finis. Au besoin, les différentes gammes de fabrication peuvent être confrontées en fonction du prix de revient, compte tenu des mains-d'œuvre directe et indirecte nécessaires pour leur exécution:

$$P_{cns} = \sum P_p + S_{as} + A_{as},$$

où P_{ens} est le prix de revient de l'ensemble monté;

ΣP_p, le prix de revient total des pièces et des sous-groupes faisant partie de l'ensemble;

S_{as}, le salaire de la main-d'œuvre directe occupée à l'assemblage;

A_{as}, les frais d'atelier de la section d'assemblage.

L'application de la variante technologique P''_{ens} au lieu de la variante P'_{ens} est justifiée si $P''_{ens} \leqslant P'_{ens}$ ou

$$\sum P''_p + S''_{as} + A''_{as} \leqslant \sum P'_p + S'_{as} + A'_{as}.$$

Lorsque la phase d'usinage est modifiée de façon à réduire ou exclure les travaux d'ajustage pour réaliser la conjugaison de la surface usinée, il faut effectuer la confrontation compte tenu de l'augmentation du salaire de la main-d'œuvre directe occupée à l'usinage S_u :

$$(S''_u + A''_u) - (S'_u + A'_u) \leqslant (S'_{as} + A'_{as}) - (S''_{as} + A''_{as}).$$

A titre d'exemple d'une telle modification de la phase on peut citer le remplacement des travaux de grattage, après le rabotage de dégrossissage et de finition, par le rabotage fin à l'outil pelle.

Si l'on introduit une opération supplémentaire (la rectification, par exemple) qui supprime lors de l'assemblage une opération d'ajustage (le grattage, par exemple), il faut observer la condition suivante :

$$S_u + A_u \leqslant S_{as} + A_{as},$$

où S_u est le salaire de la main-d'œuvre directe occupée à l'usinage supplémentaire ;
A_u, les frais d'atelier qui lui sont associés ;
S_{as}, le salaire de la main-d'œuvre directe qui devait être payé pour l'ajustage (à exclure) ;
A_{as}, les frais d'atelier qui devaient lui être associés.

Passant des considérations générales aux mesures concrètes, indiquons que la diminution de la quantité de travail nécessaire pour l'exécution des gammes d'usinage peut être réalisée de nombreuses manières qui ouvrent devant les agents de méthodes un vaste champ d'activité. C'est pourquoi nous allons nous borner à l'examen des solutions essentielles de l'augmentation de la productivité.

La fabrication des machines à unités d'usinage se développant toujours plus, il est plus logique dans de nombreux cas d'établir les gammes d'usinage en fonction non pas de l'équipement type produit par les industries mécaniques, mais en prévoyant la mise en œuvre de machines semi-automatiques à unités d'usinage constituées de têtes et d'autres ensembles normalisés. Cela permet d'établir une gamme optimale pour les conditions de production considérées et d'assurer une productivité de travail élevée. Le réglage prévoit alors des outils multiples et un cycle d'usinage simultané ou mixte des pièces multiples qui permet de réunir en une phase plusieurs reprises de perçage ou de fraisage, d'alésage ou de tournage des trous, de dressage des faces, de poinçonnage et de rodage des trous, de trépannage des surfaces en bout, de fraisage des plans et

même de trempe aux courants haute fréquence. Ainsi, en construction mécanique actuelle l'établissement des gammes d'usinage peut ne pas se faire nécessairement sur la base de l'équipement sorti. On peut composer des machines à unités d'usinage spéciales conformes à la gamme d'usinage optimale.

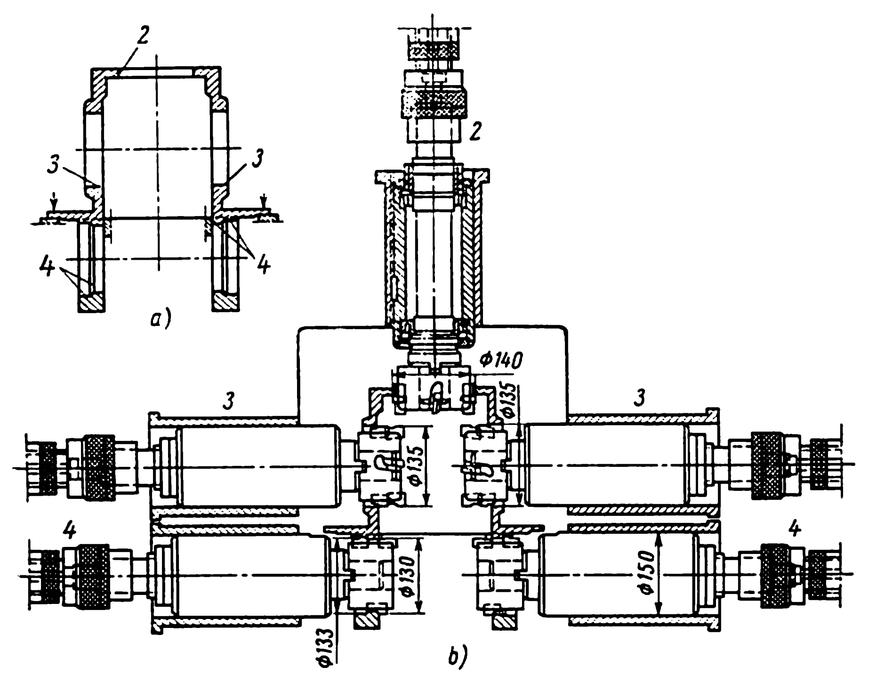


Fig. 290. Exemple de réglage pour l'usinage d'un carter de démultiplicateur sur une machine à unités d'usinage assurant le façonnage simultané des trois côtés:

a — carter de démultiplicateur ; *b* — usinage du carter de démultiplicateur (*1-4* — reprises): *1* — dépose d'une ébauche façonnée et mise en place d'une nouvelle ébauche ; *2* — alésage du trou ⌀ 140 mm ; *3* — alésage des deux côtés du trou ⌀ 135 mm ; *4* — alésage des deux côtés des trous étagés ⌀ 130 et ⌀ 133 mm. Toutes les reprises s'exécutent simultanément

L'aug mentation de la productivité, réalisée par la mise en œuvre des machines à unités d'usinage, est due à la diminution importante du temps machine principal et secondaire. Le temps machine principal diminue par suite du façonnage simultané de plusieurs surfaces élémentaires de l'ébauche ; le temps secondaire diminue en fonction de la réduction du temps de mise en place et du temps des courses à vide pour l'approche et le recul de l'outil en cours d'usinage. La diminution de ces éléments du temps secondaire correspond au temps nécessaire pour l'exécution des phases, des sous-phases

et des reprises réalisées ensemble grâce à l'application des unités d'usinage. Lorsqu'on travaille sur des machines à unités d'usinage à plateau carrousel, le temps secondaire diminue également du fait qu'il est chevauché par le temps machine principal. A titre d'exemple, la figure 290 montre un réglage pour l'usinage d'un carter de démultiplicateur sur une machine assurant le façonnage simultané des trois côtés, et la figure 291, le réglage pour l'usinage d'un chapeau de palier sur une machine à plateau carrousel à cinq indexages.

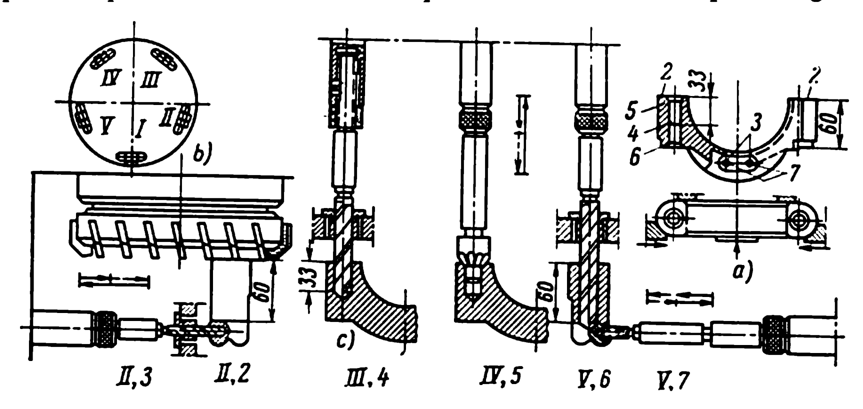


Fig. 291. Exemple de réglage pour l'usinage d'un chapeau de palier sur une machine à unités d'usinage à plateau carrousel à cinq indexages:

a — chapeau de palier ; *b* — schéma des indexages (*I-V*) du plateau ; *c* — façonnage du chapeau (*1-7* — reprises) : *I*, *1* — dépose d'une ébauche finie et mise en place d'une ébauche nouvelle ; *II*, *2* — fraisage du plan de joint ; *II*, *3* — perçage de deux trous prévus pour le filetage M8 × 1,25 de la 2e classe ; *III*, *4* — perçage de deux trous prévus pour des boulons de serrage à une profondeur de 33 mm ; *IV*, *5* — chanfreinage de deux trous ; *V*, *6* — perçage débouchant de deux trous prévus pour des boulons de serrage ; *V*, *7* — taraudage de deux trous M8 × × 1,25. Les reprises se font suivant le cycle mixte

Les machines à unités d'usinage permettent de réaliser couramment la 3e classe de précision ; en utilisant des outils de précision et en assurant un meilleur guidage, cette spécification peut même être améliorée.

En construction mécanique lourde l'utilisation de ces machines conduit également à une augmentation considérable de la productivité. L'ébauche est alors posée sur un marbre de fonte raboté reposant betonné sur le sol de l'atelier et comportant des rainures en T ; les machines universelles portatives (aléseuses, fraiseuses, perceuses radiales, etc.) ou les unités d'usinage normalisées sont placées sur le même marbre autour de l'ébauche ; parfois les machines universelles portatives (mortaiseuses, perceuses, etc.) sont fixées directement à l'ébauche. Les installations à unités d'usinage permettent de façonner simultanément plusieurs surfaces élémentaires ; il en résulte donc une économie importante du temps principal.

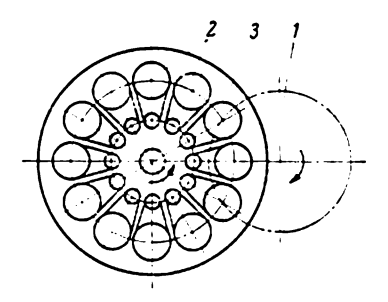


Fig. 292. Façonnage schématisé sur une fraiseuse verticale et une rectifieuse plane à plateau carrousel:
1 — fraise ou meule; *2* — ébauches; *3* — plateau carrousel

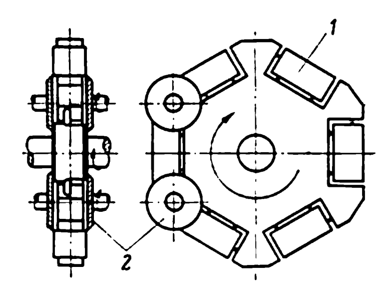


Fig. 293. Schéma de dégrossissage et de finition sur une fraiseuse à tambour à action continue:
1 — ébauches; *2* — fraises

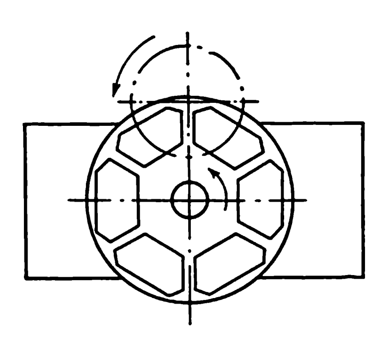


Fig. 294. Plateau carrousel prévu pour une fraiseuse verticale

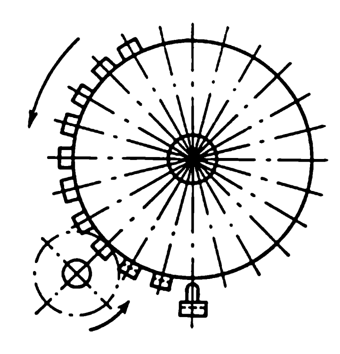


Fig. 295. Tambour prévu pour une fraiseuse horizontale

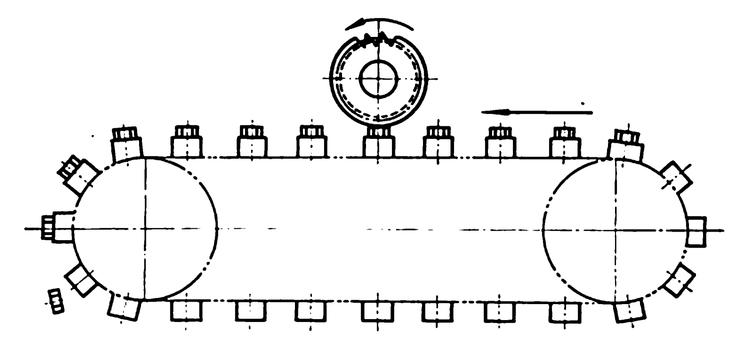


Fig. 296. Chaîne prévue pour une fraiseuse horizontale

La productivité est nettement élevée par l'utilisation des fraiseuses verticales et des rectifieuses planes à plateau carrousel (fig. 292), ainsi que des fraiseuses à tambour à action continue (fig. 293) qui permettent d'effectuer simultanément le dégrossissage et la finition. L'ablocage et le déblocage des pièces sur ces machines se font pendant que la table ou le tambour tournent à une vitesse égale à l'avance circulaire; ainsi, le temps secondaire est chevauché par le temps principal; il en résulte une productivité accrue.

On obtient les mêmes résultats en dotant une fraiseuse verticale d'un plateau carrousel (fig. 294) ou d'un tambour (fig. 295) et une fraiseuse horizontale d'un montage sous forme de chaîne (fig. 296).

La productivité peut être accrue également, bien qu'à une échelle moindre, par l'application des fraiseuses comportant des plateaux d'indexage (voir fig. 274) et des montages à avance pendulaire (voir fig. 273); dans ces conditions le temps nécessaire pour la mise en place des ébauches est chevauché par le temps machine principal; pourtant une avance pendulaire conduit à une perte de temps pour le renversement de la course de la table et la course à vide de la fraise. Les montages multiples prévus pour l'usinage simultané ou mixte sur des fraiseuses augmentent la productivité grâce à la diminution du temps machine principal et au chevauchement du temps secondaire.

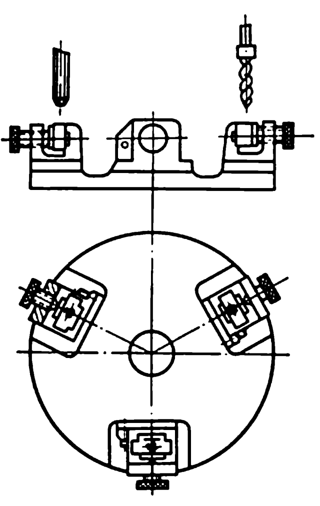


Fig. 297. Montage pivotant à trois indexages prévu pour l'exécution des trous sur une perceuse

L'emploi des unités d'usinage multibroches sur des perceuses permet de réduire le temps principal et secondaire en exécutant simultanément des trous. L'application des perceuses munies de montages d'indexage permet également d'accroître la productivité en faisant coïncider les reprises et en assurant le chevauchement du temps secondaire par le temps machine principal; ainsi un montage à trois indexages placé sur une perceuse à deux broches ou sur une perceuse à une broche portant une tête à deux broches (fig. 297) permet d'assurer simultanément le cycle mixte de perçage et d'alésage des trous dans les deux ébauches. Pendant l'exécution simultanée du perçage et de l'alésage, l'ébauche usinée est dégagée pour céder la place à une nouvelle ébauche. Ensuite le montage pivote de 120° ; le trou percé est ainsi placé en regard de l'alésoir, l'ébauche nouvellement abloquée, face au foret, et l'ébauche alésée est amenée en indexage d'ablocage n'ayant pas outil.

L'utilisation des tours semi-automatiques à outils multiples permet d'élever la productivité grâce au façonnage simultané des surfaces élémentaires d'un arbre à fusées ou à la diminution de la course de l'outil lors de l'exécution d'un arbre lisse (fig. 298); dans ce cas la course de l'outil l_0 est nettement inférieure à la longueur de la surface usinée L_u. Pourtant dans le cas des arbres lisses exécutés à partir de barres calibrées, il est plus avantageux de les rectifier, car le tournage par outils multiples n'est suffisamment efficace que dans le cas des arbres à fusées rigides; les déformations importantes résultant de l'usinage des arbres peu rigides obligent à diminuer la profondeur de coupe et l'avance; il est plus avantageux de façonner les ébauches peu rigides sur des tours à recopier hydrauliques semi-automatiques très rapides.

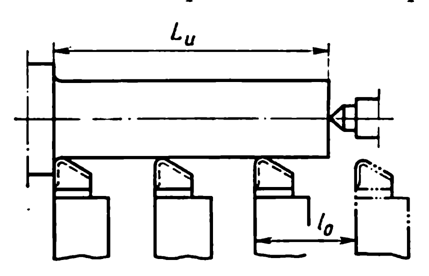


Fig. 298. Schéma de tournage d'un arbre lisse par des outils multiples

La productivité peut être nettement accrue dans le cas d'un réglage des tours semi-automatiques à outils multiples pour un groupe de pièces, en effectuant un usinage simultané de plusieurs ébauches (fig. 299).

En construction mécanique lourde, la productivité peut être augmentée par l'utilisation des machines multibroches et à chariots multiples. Dans ce cas, on s'efforce de mettre en œuvre toutes les broches et tous les chariots disponibles, ainsi que la course maximale de la machine en façonnant les pièces par lots. La disposition des ébauches sur la table de la machine doit assurer une distribution régulière de la charge sur les glissières de la table et réduire au possible les courses à vide. La figure 300 représente à titre d'exemple un façonnage simultané de quatre ébauches sur une raboteuse. Les fraiseuses genre raboteuses peuvent être utilisées d'une manière analogue.

Pour réunir les reprises on peut utiliser également des outils combinés monoblocs ou assemblés. Parmi les outils de ce genre il y a les forets, les fraises et les alésoirs étagés, les forets aléseurs étagés, les outils à lamer étagés et assemblés, etc. Les outils combinés assemblés sont plus simples dans la fabrication que les outils combinés monoblocs et dans plusieurs cas plus commodes dans l'exploitation, car ils permettent le rétablissement des dimensions ou le remplacement des éléments usés ou émoussés. On peut rapporter également aux outils combinés les trains d'outils simples ou combinés fixés sur une tête ou un porte-outil et prévus pour le façonnage complexe des surfaces élémentaires d'une ébauche (barres d'alé-

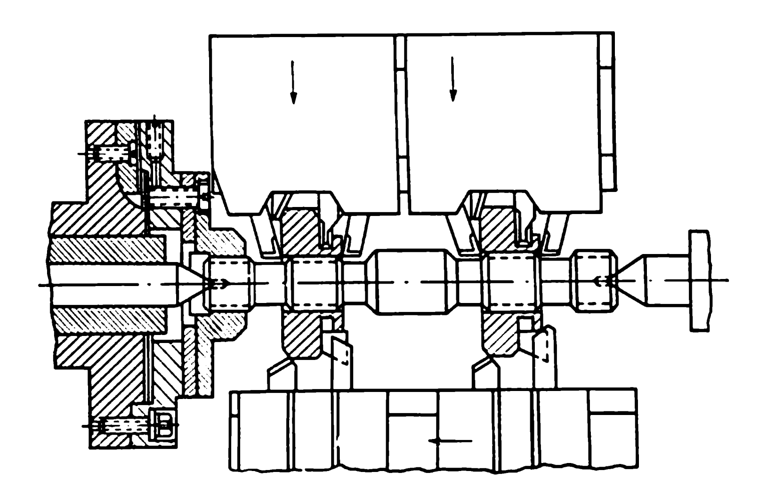


Fig. 299. Réglage apparié d'un tour semi-automatique à outils multiples pour l'usinage simultané de deux ébauches de pignons

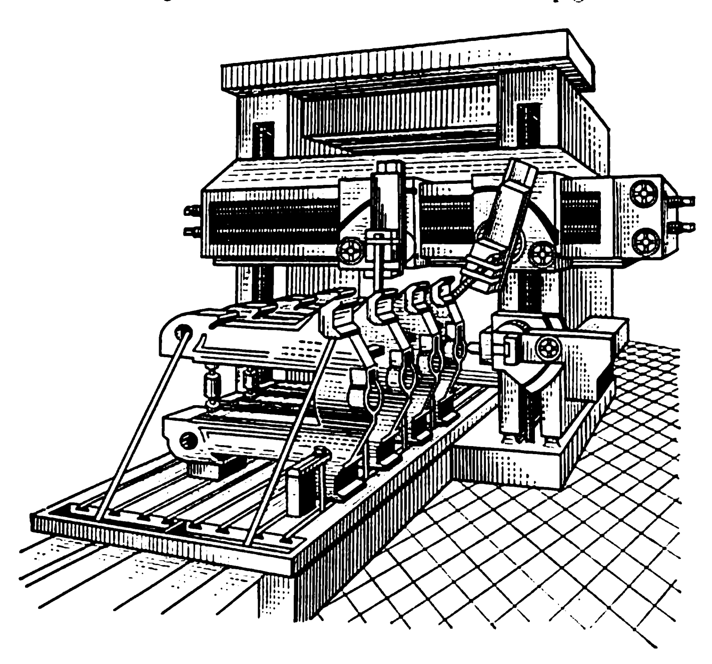


Fig. 300. Façonnage de quatre ébauches sur une raboteuse

sage ou mandrins pour l'exécution des trous étagés, porte-outils multiples pour le façonnage des surfaces étagées, porte-outils avec des forets et des outils prévus pour les opérations simultanées de tournage des surfaces extérieures et de perçage des trous, etc.). La mise en œuvre des outils combinés peut être recommandée surtout lorsque les indexages des machines à unités d'usinage ne suffisent pas pour réaliser le façonnage imposé ou pour réduire le nombre de reprises lorsqu'on travaille sur des machines universelles.

La productivité peut être augmentée en diminuant la course de l'outil soit en divisant la longueur d'usinage entre plusieurs outils, soit en effectuant une avance transversale (en plongée) au lieu d'une avance longitudinale.

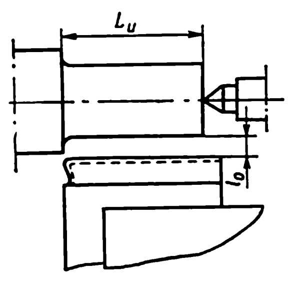


Fig. 301. Exemple d'usinage « en plongée » (tournage avec avance transversale)

La division de la longueur totale d'usinage d'une même surface entre plusieurs outils travaillant suivant un cycle simultané ou mixte peut être illustrée notamment par le tournage par outils multiples d'un arbre lisse (voir fig. 298), lorsque les divers secteurs de l'arbre sont façonnés simultanément.

La coupe « en plongée » s'opère dans le cas où l'outil est susceptible de couvrir simultanément toute la longueur relativement peu importante de la surface usinée. Ce mode d'usinage peut être illustré par les exemples suivants: tournage avec une avance transversale (radiale) au lieu d'une avance longitudinale (fig. 301); dans ce cas la longueur de la course de l'outil l_0 est nettement inférieure à celle d'usinage L_u ; il en est de même pour le dressage des faces avec une avance axiale au lieu d'une avance radiale, pour l'alésage avec une avance transversale au lieu d'une avance longitudinale, pour le lamage d'une face au lieu de son dressage avec une avance radiale, pour le brochage remplaçant d'autres modes d'usinage, pour l'exécution d'un filet par fraisage au peigne et non à la fraise à disque ou à l'outil à fileter, etc. ; pour améliorer l'état de surface, on diminue l'avance en fin du cycle qui se termine, l'outil étant maintenu quelque peu sans avance. Ces procédés très productifs peuvent être utilisés efficacement non seulement dans la fabrication de masse, mais également dans les fabrications d'autres types.

L'augmentation de la productivité est favorisée aussi par l'application des mouvements rapides à l'approche et au recul des outils, ainsi que par l'accélération des courses à vide lors de l'usinage à postes multiples; dans l'exécution des filets on y parvient en employant des têtes à fileter et à tarauder comportant des peignes

dont le détaraudage s'effectue automatiquement en fin de course, éliminant ainsi le desserrage de l'outil.

Le temps principal peut être réduit dans certains cas par la modification du régime de coupe en cours d'usinage. Il est d'usage d'établir le régime de coupe en partant des conditions d'usinage les plus défavorables; notamment, pour le tournage d'une surface conique ou le dressage d'une face, la vitesse de coupe est fonction des diamètres maximaux du cône ou de la face; dans ces conditions le régime de coupe reste le même pendant tout le cycle d'usinage.

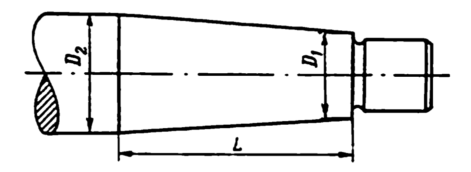


Fig. 302. Illustration du calcul du temps principal d'usinage d'une surface conique lorsque n = const et v = const

Par ailleurs, en travaillant sur des machines à variation continue de la vitesse de broche il est avantageux de modifier les régimes de travail au sein d'un cycle d'usinage.

Pour apprécier l'économie réalisée du temps principal t_m on peut recourir aux calculs suivants.

Pour l'usinage d'une surface conique d'une longueur L (fig. 302), le régime d'exécution de la machine étant constant (n = const), on a

$$t'_m = \frac{L}{a'} = \frac{L}{na} = \frac{L\pi D_2}{1000 \cdot va},$$

car

$$a' = na = \frac{1000 \cdot va}{\pi D_2},$$

où a' est l'avance par minute en mm;
n, le nombre de tours par minute;
a, l'avance par tour en mm;
v, la vitesse de coupe en m/mn.

Pour l'usinage de la même surface, le nombre de tours étant variable et la vitesse de coupe constante (v = const), on a

$$a'' = f(D); \quad a'' = \frac{dL}{dt''_m}; \quad dt''_m = \frac{dL}{a''};$$

$$t''_m = \int_0^L \frac{dL}{f(D)} = \int_0^L \frac{dL\pi D}{1000 \cdot va} = \frac{\pi}{1000 \cdot va} \int_0^L D\,dL;$$

$$\frac{t'_m}{t''_m} = \frac{L\pi D_2}{1000 \cdot va} : \frac{\pi}{1000 \cdot va} \int_0^L D\,dL = \frac{D_2 L}{\int_0^L D\,dL} = \frac{D_2 L}{\frac{D_2 + D_1}{2} L} = \frac{2D_2}{D_2 + D_1}.$$

La relation

$$\frac{t'_m}{t''_m} = \frac{2D_2}{D_2 + D_1}$$

montre que lorsque le diamètre D_1 diminue, la relation $\frac{t'_m}{t''_m}$ tend vers 2, c'est-à-dire que pendant l'usinage à v = const le temps principal diminue d'autant plus, par rapport à l'usinage à n = const, que la différence $D_2 - D_1$ est plus grande.

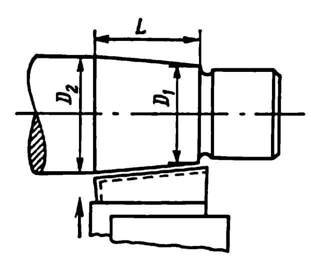


Fig. 303. Illustration du calcul du temps principal d'usinage d'une surface conique par avance longitudinale et par avance « en plongée ».

Mais l'usinage des surfaces coniques sur une machine à variation continue de la vitesse de broche est avantageux lorsque la longueur L de la surface conique est importante; pour des portées coniques courtes, l'avance en plongée est beaucoup plus efficace (fig. 303). Dans ce cas le façonnage se fait par modification étagée de l'avance transversale, en la diminuant au fur et à mesure qu'on s'approche de la cote imposée et en effectuant, pour terminer, quelques tours sans avance pour assurer un meilleur état de surface.

Dans le cas d'une avance étagée le temps principal se calcule suivant la formule

$$t'''_m = \frac{pz}{na_1} + \frac{qz}{na_2} + \frac{rz}{na_3} + \frac{n_{sa}}{n} = \frac{1}{n}\left(\frac{pz}{a_1} + \frac{qz}{a_2} + \frac{rz}{a_3} + n_{sa}\right),$$

où p, q, r sont les coefficients définissant la part de la surépaisseur totale enlevée par les avances a_1, a_2, a_3;

z, la surépaisseur d'usinage suivant le rayon;

n, le nombre de tours par minute;

n_{sa}, le nombre de tours sans avance.

Lorsque les surépaisseurs sont peu importantes, la diminution du diamètre lors de l'enlèvement de la surépaisseur étant très faible, l'usinage se fait à un nombre de tours constant et défini en partant du plus grand diamètre de la surface conique.

En remplaçant n par sa valeur $\frac{v}{\pi D^2}$, on obtient

$$t'''_m = \frac{\pi D_2}{v}\left(\frac{pz}{a_1} + \frac{qz}{a_2} + \frac{rz}{a_3} + n_{sa}\right).$$

Exemple. Calculer le temps principal d'usinage de la portée conique d'un arbre (D_2 = 50 mm; D_1 = 45 mm; L = 40 mm) pour les trois variantes:

1) à régime constant (n = const), t'_m;

2) à nombre de tours variable (v= const), t''_m;

3) à avance « en plongée », changement étagé de l'avance transversale et vitesse constante, t'''_m

$$t'_m=\frac{\pi D_2 L}{1000\cdot va}=\frac{\pi\cdot 50\cdot 40}{1000\cdot 50\cdot 0,3}\approx 0,42 \text{ mn};$$

$$t''_m=\frac{\pi}{1000\cdot va}\int_0^L D\,dL=\frac{\pi}{1000\cdot va}\cdot\frac{D_2+D_1}{2}L=$$

$$=\frac{\pi}{1000\cdot 50\cdot 0,3}\cdot\frac{50\cdot 45}{2}\cdot 40\approx 0,4 \text{ mn};$$

$$t'''_m=\frac{\pi D_2}{1000\cdot v}\left(\frac{pz}{a_1}+\frac{qz}{a_2}+\frac{rz}{a_3}+n_{sa}\right)=$$

$$=\frac{\pi\cdot 50}{1000\cdot 50}\left(\frac{0,45\cdot 2}{0,06}+\frac{0,3\cdot 2}{0,04}+\frac{0,25\cdot 2}{0,02}+5\right)\approx 0,2 \text{ mn};$$

$$\frac{t'_m}{t''_m}=\frac{2D_2}{D_2+D_1}=\frac{2\cdot 50}{50+45}=1,05; \qquad \frac{t'_m}{t''_m}=\frac{0,42}{0,4}=1,05.$$

Ce résultat montre que dans les conditions imposées (portée conique courte) : l'usinage à v = const ne donne pas d'effet perceptible.

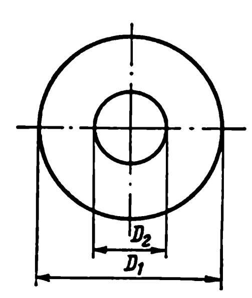


Fig. 304. Illustration du calcul du temps principal de tronçonnage, de saignage et de dressage des faces lorsque n = const et v = const

En confrontant l'usinage à n = const avec celui par avance « en plongée », on a

$$\frac{t'_m}{t'''_m}=\frac{0,42}{0,2}=2,1.$$

En confrontant l'usinage à $v\approx$conts avec celui par avance «en plongée», on a $\frac{t''_m}{t_{'''m}}=\frac{0,4}{0,2}=2.$

Ainsi en appliquant l'avance « en plongée », on diminue de 2 à 2,1 fois le temps principal par rapport à d'autres modes d'usinage.

En effectuant le tronçonnage, le saignage et le dressage des faces à un nombre de tours variable (v = const), on peut réduire nettement le temps principal (fig. 304).

Le temps principal à n = const

$$t'_m=\frac{L}{a'}=\frac{R_1-R_2}{na}=\frac{(R_1-R_2)\,2\pi R_1}{1000\cdot va}.$$

Le temps principal à $v = \text{const}$

$$a'' = \frac{dR}{dt''_m}; \quad a'' = f(R); \quad a'' = \frac{1000 \cdot va}{2\pi R};$$

$$dt''_m = \frac{dR}{a''}; \quad t''_m = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR}{f(R)} = \int_{R_1}^{R_2} \frac{dR \cdot 2\pi R}{1000 \cdot va} =$$

$$= \frac{2\pi}{1000 \cdot va} \int_{R_1}^{R_2} R\, dR = \frac{2\pi}{1000 \cdot va} \cdot \frac{R_1^2 - R_2^2}{2} = \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2)}{1000 \cdot va}.$$

En confrontant t'_m et t''_m, on obtient

$$\frac{t'_m}{t''_m} = \frac{(R_1 - R_2)\, 2\pi R_1}{1000 \cdot va} : \frac{\pi (R_1^2 - R_2^2)}{1000 \cdot va} =$$

$$= \frac{(R_1 - R_2)\, 2R_1}{R_1^2 - R_2^2} = \frac{(R_1 - R_2)\, 2R_1}{(R_1 + R_2)(R_1 - R_2)} = \frac{2R_1}{R_1 + R_2}.$$

Lorsque R_2 diminue le rapport $\frac{t'_m}{t''_m}$ tend vers 2 ; pour le façonnage d'une face continue ($R_2 = 0$) à $v = \text{const}$ le temps principal diminue de deux fois par rapport à celui à $n = \text{const}$.

Les machines-outils modernes sont caractérisées par leurs rapidité, avances importantes, rigidité accrue et puissance des commandes nettement augmentée. Les nouveaux matériaux d'outillage permettent d'effectuer l'usinage à de grandes vitesses de coupe, alors que la conception des outils modernes et la géométrie du tranchant autorisent en plus l'application d'avances importantes. Des vitesses de coupe de l'ordre de 150 à 450 m/mn (pour les métaux ferreux) et jusqu'à 6000 m/mn (pour les métaux non ferreux) sont considérées comme courantes. Les avances assurées par des fraiseuses modernes atteignent 2500 mm/mn pour la fonte grise et 6000 mm/mn pour les métaux non ferreux ; les outils conçus par le tourneur novateur V. Kolessov rendent possible la finition avec une avance de 5 mm/tr. Ces données témoignent d'une très grande possibilité d'élever la productivité en améliorant les régimes de coupe pour réduire le temps principal.

La productivité N est définie comme on le sait par la formule (164)

$$N_h = \frac{60}{T_p},$$

qui montre que la productivité varie en raison inverse du temps d'usinage par pièce ; ce dernier est calculé suivant la formule (156)

$$T_p = \left(1 + \frac{t_{per}}{100} + \frac{t_{org}}{100}\right) T_{op} + T_t.$$

En posant

$$1+\frac{t_{prr}}{100}+\frac{t_{org}}{100}=q$$

et compte tenu que

$$T_{op}=T_m+T_s,$$

on obtient

$$T_p=q\,(T_s+T_m)+T_t.$$

Le temps T_t nécessaire pour remplacer les outils, rapporté à une ébauche usinée, est calculé suivant la formule (163)

$$T_t=\frac{T_{out}t_m}{T},$$

où T_{out} est le temps d'exécution de chaque remplacement de l'outil, en mn;

T, la durée de l'outil en mn.

Dans ces conditions, à une avance constante, le temps t_m pour chaque passe varie en raison inverse de la vitesse de coupe v:

$$t_m=\frac{\pi DL}{1000\cdot va}=\frac{c_{t_m}}{v},$$

où

$$c_{t_m}=\frac{\pi DL}{1000\cdot a}.$$

En remplaçant la valeur de T_t dans la formule du temps d'usinage par pièce, on obtient

$$T_p=q\,(T_s+T_m)+\frac{T_{out}t_m}{T};$$

pour l'usinage à une passe $T_m=t_m$; alors

$$T_p=q\left(T_s+\frac{c_{t_m}}{v}\right)+\frac{T_{out}}{T}\cdot\frac{c_{t_m}}{v}=qT_s+\frac{c_{t_m}}{v}\left(q+\frac{T_{out}}{T}\right).$$

Avec l'augmentation de la vitesse de coupe t_m diminue, T_t augmente quelque peu par suite de la réduction de la durée, et si T_s reste constant, le temps d'usinage par pièce T_p diminue plus lentement que le temps principal t_m. C'est pourquoi le meilleur effet est obtenu lorsque tout en élevant le régime de coupe on entreprend des mesures pour réduire le temps secondaire T_s.

Le temps nécessaire pour l'ablocage de l'ébauche et son desserrage constitue une partie importante du temps secondaire. C'est pourquoi le temps d'usinage par pièce diminue le plus, comme nous l'avons déjà signalé, lorsque le temps de préparation (mise en place et dégagement de l'ébauche) est chevauché par le temps machine, c'est-à-dire par le temps principal, dans le cas d'usinage sur les

machines-transferts et sur les machines semi-automatiques à indexages multiples. L'utilisation des plateaux à indexages sur des fraiseuses et des perceuses permet également de réduire le temps secondaire. Le chevauchement du temps de préparation par le temps machine à des vitesses de coupe élevées est rendu possible par l'emploi des montages à action rapide ; ces montages réduisent également d'une manière sensible le temps secondaire dans les cas où l'usinage n'assure pas le chevauchement du temps secondaire par le temps machine. Ainsi le problème de la diminution du temps secondaire à l'aide de montages à action rapide se pose quels que soient les cas de travail à la machine-outil.

L'effet maximal est obtenu lorsque l'ablocage des ébauches à usiner et l'évacuation des ébauches finies d'usinage s'effectuent à l'aide de systèmes automatiques comportant des magasins et des dispositifs de serrage et d'éjection.

Parfois on parvient ainsi à accroître la productivité de 2 à 2,5 fois par automatisation de l'ablocage et du déblocage des ébauches usinées sur un montage à fraiser ; la mise en place et le dégagement des ébauches se font dans ce cas à la main, c'est-à-dire sans prévoir ni magasin ni gouttière d'amenée. Dans plusieurs cas, on se borne à une automatisation partielle du montage, par exemple à celle de l'éjection de l'ébauche finie. Le remplacement d'une action manuelle par le serrage pneumatique, hydraulique ou oléopneumatique des ébauches est très efficace, de même que l'utilisation des dispositifs de serrage par inertie.

Il est parfois avantageux de remplacer le serrage par vis par des dispositifs à excentrique ; d'autres solutions sont possibles lors de l'établissement des montages d'exécution comme, par exemple, le remplacement du serrage à la main par un serrage par pédale, laissant ainsi libres les deux mains de l'ouvrier.

La réduction des frais de temps secondaire est obtenue en augmentant les vitesses de recul des chariots et des broches en position initiale, les vitesses des courses à vide des outils et d'autres déplacements secondaires. Le système de commande du cycle de travail et l'aménagement bien étudié du poste de travail sont également des facteurs qui influent d'une manière importante sur la valeur du temps secondaire.

Les considérations exposées n'épuisent certes pas les solutions possibles du problème de l'amélioration de la productivité ; par ailleurs, l'action des agents de méthodes dans ce domaine permet d'enregistrer des résultats positifs, surtout lorsque la diminution des temps principal et secondaire s'accompagne d'un ordonnancement logique des phases d'usinage.

La diminution du cycle de production et celle des pertes de temps relatives à l'organisation peuvent être obtenues par la régle-

mentation des gammes de production mettant en œuvre, en construction mécanique, la fabrication continue en grande série et de masse. Une ligne continue moderne effectue non seulement l'usinage, mais encore le traitement thermique, le soudage et, souvent, les opérations d'ébauchage (estampage à chaud ou moulage).

L'implantation de l'équipement, employé dans une fabrication continue, simplifie l'automatisation de l'acheminement des ébauches usinées. Ainsi, en construction mécanique, la ligne continue est une base pour l'automatisation complexe de toute la gamme de production.

L'automatisation de la fabrication réduit considérablement la main-d'œuvre occupée, rendant ainsi plus rentable la production.

L'automatisation n'est pas seulement l'apanage de la fabrication en grande série ou de masse, elle peut être également appliquée dans la fabrication en petite série en remplaçant les machines universelles par les machines automatiques à un outil à commande programmée. Dans la fabrication unitaire on enregistre un certain effet en rendant mécaniques les courses à vide et en employant des dispositifs assurant un changement rapide des vitesses et des avances.

Les travaux d'assemblage sont caractérisés par les tendances suivantes dans la solution des problèmes que pose une productivité accrue.

La différenciation des phases d'assemblage conformément à l'établissement des éléments d'assemblage du produit rend possible l'exécution simultanée du montage des ensembles et de l'assemblage du produit, la spécialisation des opérateurs et la mise en œuvre aux postes de travail d'un appareillage productif. On obtient ainsi un cycle d'assemblage réduit, alors que la productivité s'accroît.

En confondant plusieurs reprises en une seule phase on diminue la durée du cycle d'assemblage.

La mécanisation des travaux d'ajustage et d'assemblage, quel que soit le type de la fabrication, diminue nettement le temps principal (machine), de même que le temps secondaire, en augmentant ainsi la productivité du travail.

L'application du principe de l'interchangeabilité, qui élimine la nécessité d'ajustage des éléments conjugués, réduit la quantité de travail d'assemblage. D'autre part, l'interchangeabilité autorise l'application de modes très productifs d'assemblage continu, fondés, comme on le sait, sur le principe de la différenciation logique des opérations d'assemblage permettant l'exécution simultanée des reprises. Toutes ces mesures non seulement diminuent la durée du cycle d'assemblage, mais encore permettent d'enregistrer une augmentation importante de la productivité.

L'assemblage continu et l'automatisation de ses opérations sont les procédés les plus efficaces d'augmentation de la productivité du travail.

L'assemblage qui est l'échelon final de la fabrication définit la structure des gammes de tous les échelons antérieurs de la production. Ainsi les gammes d'assemblage continu et automatisé élèvent le niveau technologique à tous les échelons de la production.

§ 2. Tendances principales du développement des modes de fabrication en construction mécanique

Tendances dans le domaine d'exécution des ébauches: utilisation des profilés et des bandes obtenues par formage; perfectionnement des procédés d'exécution des pièces forgées et moulées.

Modifications des gammes d'usinage imposées par l'application de méthodes modernes d'exécution des ébauches.

Tendances du développement des gammes d'assemblage.

Relations entre le perfectionnement de la construction des éléments de machines et les gammes de leùr fabrication.

Une des tendances essentielles du développement de la construction mécanique est l'automatisation. Dans les années à venir, on prévoit en U.R.S.S. d'étendre sensiblement l'automatisation de la fabrication dans ce domaine.

Il faut insister sur le fait que l'automatisation implique l'élévation du niveau technologique et technique à tous les échelons de la gamme de production. En partant de cette idée nous allons passer en revue les principes essentiels du développement des modes de fabrication en construction mécanique.

Dans les entreprises de construction mécanique de l'U.R.S.S. on prévoit une application toujours plus poussée des modes de fabrication nouveaux; signalons donc les tendances principales du développement des opérations d'ébauchage.

Dans les conditions d'une fabrication de masse ou en grande série, il faut rendre possible l'utilisation à une large échelle des profilés spéciaux, assurant ainsi non seulement une économie importante de métal, mais encore une diminution très sensible de la quantité de travail nécessaire pour l'exécution de l'usinage ultérieur. Pour fabriquer des pièces de précision élevée à partir de laminés, on peut faire appel à l'étirage des profilés qui permet d'obtenir un profil reproduisant le contour de la pièce finie avec une précision qui rend inutile l'usinage ultérieur.

En plus des avantages que présentent les profilés spéciaux, l'application du formage permet encore l'obtention d'ébauches d'une précision plus élevée, ainsi que de profilés impossibles à obtenir par laminage.

Dans la fabrication des pièces forgées, on utilisera à une vaste échelle les presses mécaniques et les marteaux à estamper au lieu des presses et des marteaux à forgeage libre à faible rendement dont l'utilisation se limitera à la fabrication unitaire. Il faudra également

recourir aux procédés suivants: chauffage des ébauches dans les chambres des fours à gaz, chauffage par courants de haute fréquence et de fréquence utilisée dans l'industrie, chauffage par contact électrique, traitement thermique des pièces forgées dans des bains de sel, ce qui rend possible la fabrication continue des pièces forgées sans nettoyage ultérieur.

Il convient de noter que la productivité des marteaux à estamper et la précision qu'ils permettent d'obtenir sont bien inférieures à celles des presses mécaniques qui dans l'avenir seront surtout employées.

Le calibrage par frappage des ébauches estampées élève nettement la précision et la qualité des surfaces et rend inutile leur usinage ultérieur ou le limite à la rectification réalisée directement après le frappage.

La mise en œuvre de nouvelles machines à forger à chauffage par induction incorporé permettra de réunir en un cycle de travail le réchauffement accéléré (20 à 40 s) et la formation de l'ébauche, d'éliminer les pailles et d'automatiser l'estampage. L'utilisation des laminoirs de forge est dans certains cas un moyen avantageux pour fabriquer une bande d'ébauches liées entre elles par une bavure métallique chutée sur une presse à ébavurer. De plus, les laminoirs de forge peuvent s'employer pour l'obtention de profilés à bulbe finis ensuite sur des marteaux ou des presses à estamper, assurant ainsi une économie de métal, une meilleure durée des matrices et une productivité accrue.

Le forçage à froid qui se fait sur des presses automatiques à productivité élevée doit trouver une large application dans la fabrication des boulonneries et autres pièces (poussoirs, rouleaux, billes, obturateurs, petits arbres à fusées, etc.) en tant que procédé très précis rendant inutile l'usinage ultérieur.

L'emboutissage et le découpage des tôles à froid est une technique de fabrication très productive; son application à une large échelle assurera dans certains cas une réduction importante de la quantité de travail nécessaire pour l'exécution des pièces et des ensembles sans usinage ultérieur.

Il ne faut pas oublier que la mise en œuvre des constructions soudées, notamment des constructions estampées et soudées, est susceptible de réduire la quantité de travail. A cet effet, il faut utiliser à une échelle plus vaste les soudages automatique et semi-automatique sous flux, soudage sous flux séparé, soudage sous gaz de protection, soudage par résistance et autres modes progressifs de soudage autorisant une mécanisation et une automatisation maximales des opérations de soudage continu.

Pour élever la précision des pièces moulées et diminuer le volume d'usinage, il faut appliquer largement le moulage à cire perdue,

en coquilles, en carapace, sous pression avec utilisation des modes de fabrication continue. Dans la fabrication de masse et en grande série, il faut multiplier l'application des moules métalliques pour l'exécution de grosses pièces complexes, avec utilisation des enduits et des peintures de qualité, des revêtements en sable à parois minces, des noyaux métalliques et en sable. Dans la fabrication en petite série et dans la fabrication unitaire, les travaux de moulage et de noyautage doivent être mécanisés en prévoyant l'utilisation des constructions existantes des machines sur la base des plaques modèles et des boîtes à noyaux aisément démontables; le moulage au sol doit être très réduit et remplacé par le moulage en châssis, par carcasse et par noyaux. Dans tous les cas de fabrication des pièces de fonderie, il faut recourir largement au garnissage des moules et des noyaux par jet de sable, qui est un procédé hautement productif, ainsi qu'aux machines à jet de sable à indexages multiples prévoyant un serrage supplémentaire.

L'introduction des modes de fabrication progressifs qui viennent d'être passés en revue réduira nettement le volume d'usinage et modifiera d'une manière appréciable l'allure des phases d'usinage des ébauches brutes. Les méthodes de moulage de précision, l'estampage de précision et celui suivi de frappage permettent de limiter le façonnage des surfaces d'ajustement par l'action des meules. Les procédés moins précis d'exécution des ébauches demandent l'application d'un usinage par outil tranchant. Il ne faut prévoir le dégrossissage et la finition, ou le dégrossissage, la semi-finition et la finition, suivant les spécifications de précision de l'ébauche, que pour les ébauches obtenues par moulage en sable et estampage sur des marteaux; quant aux pièces obtenues par forgeage libre, elles imposent l'ébauchage. Le forgeage libre, cependant, ne se maintiendra qu'en fabrication unitaire; le moulage en sable s'emploiera probablement dans la fabrication unitaire et en petite série, alors que l'estampage par des marteaux, dans la fabrication en petite série. Des méthodes plus perfectionnées d'exécution des ébauches seront utilisées dans la fabrication en grande série et de masse, qui rendront possibles la diminution de la quantité totale du travail nécessaire pour la fabrication et la diminution importante de la part spécifique de l'usinage. Par ailleurs, dans l'établissement des gammes de fabrication on peut s'attendre à l'augmentation de la part spécifique de l'achèvement par suite des prescriptions toujours plus rigoureuses dans les domaines de la précision et de l'état de surface, nécessitées par les exigences toujours plus sévères de tenue à l'usure, de résistance et d'autres spécifications d'exploitation des machines. Ainsi, on peut penser que les modes de façonnage les plus usités seront l'abrasion, l'usinage fin par des outils tranchants, les modes de finition sans enlèvement de copeau, l'écrouissage par jet de grenaille et par

vibration, la superfinition et les méthodes électrochimiques de finition.

Dans le domaine d'établissement des gammes d'usinage on observe l'apparition des tendances essentielles suivantes.

Les outils à tranchants multiples viennent remplacer ceux à tranchant unique; de même qu'un outil de rabotage est remplacé actuellement par une fraise, et un outil à aléser par un foret aléseur, un alésoir ou une broche, la tendance qui se fait jour veut qu'un outil de tour soit remplacé par une fraise ou une broche. Les premières tentatives ont été déjà faites pour établir des procédés de fraisage ou de brochage au tour des surfaces de révolution extérieures; ces expériences n'ont pas encore trouvé une large application dans la production, mais ce sont là sans aucun doute des méthodes d'avenir car les outils à tranchants multiples présentent de nombreux avantages.

Le brochage qui associe les avantages d'un outil à tranchants multiples au procédé progressif de coupe par secteurs isolés est très prometteur pour l'usinage des surfaces de tous les types principaux (trous, plans, corps de révolution, etc.). Le taillage des dents des pignons par brochage de tel ou tel type est également un procédé d'avenir susceptible d'évincer l'équipement actuel avec sa cinématique compliquée, la multiplicité des mouvements d'exécution et la faible productivité par rapport aux opérations d'ébauchage et d'usinage des ébauches.

Les grandes vitesses de coupe qui au départ ont été appliquées à la fabrication des ébauches de grand encombrement s'emploient toujours plus dans toutes les branches de la construction mécanique. La vue pessimiste initiale suivant laquelle ces procédés ne pourraient pas être largement appliqués dans la fabrication des pièces mécaniques relativement petites est actuellement réfutée.

Le pierrage à faible avance et à balayage qui permet d'obtenir pour des trous une précision et un état de surface très poussés et qui est apparu dans la fabrication des appareils de précision sera sans aucun doute largement utilisé dans toutes les industries mécaniques.

Il en est de même pour le diamantage (tournage des surfaces extérieures et intérieures, fraisage, alésage, rasage).

L'usinage par étincelage peut être considéré comme une méthode prometteuse pour l'exécution de très petits trous, des contours compliqués, le façonnage des aciers trempés et des alliages durs.

Plusieurs avantages incontestables des méthodes électrochimiques permettent de les considérer également comme des méthodes d'avenir.

Toutes ces tendances essentielles dans le domaine des gammes de fabrication définissent les modifications qui seront apportées dans la composition du parc des machines-outils des ateliers d'usinage.

Il est probable que dans la fabrication de masse et en grande série le parc des ateliers d'usinage comportera : a) machines semi-automatiques à unités d'usinage à outils et à indexages multiples munies de montages à action rapide et prévues pour l'exécution en une phase de plusieurs opérations d'usinage suivant le cycle mixte ; b) machines à un outil ou à outils multiples pour finir les surfaces à précision très poussée (rectifieuses à meules multiples pour le façonnage simultané des portées des arbres, par exemple, machines à deux meules pour rectifier successivement le trou central et la face d'un pignon) ; c) machines-transferts établies sur la base des unités d'usinage normalisées, prévoyant non seulement divers modes d'usinage, mais encore le traitement thermique par courants haute fréquence, ainsi que l'assemblage des ensembles avec usinage ultérieur et le contrôle intermédiaire et définitif automatique. Dans plusieurs cas les machines-transferts peuvent exécuter également les opérations d'ébauchage et, notamment, le refoulement à froid sur des machines à forger ayant un dispositif incorporé pour le réchauffement par induction, le formage des plats, le cambrage, le soudage et le roulage des ébauches annulaires, le moulage des ébauches à partir des alliages à base d'aluminium ou de magnésium.

Des travaux importants sont poursuivis dans le domaine de la modernisation de l'équipement. Les machines universelles sont munies de matériel de mesure, de dispositifs de serrage et de mise en place, de chariots à reproduire hydrauliques, de chargeurs automatiques et autres appareillages. Un grand effort est également fourni pour créer de nombreux types de machines très productives et des machines-transferts formant des lignes automatiques. Des recherches très poussées sont à faire dans le domaine de l'application des commandes à programme, dont l'utilisation permettra d'éliminer les gabarits fabriqués avec une précision élevée. Ceci importe surtout pour les entreprises dont l'objet de fabrication est susceptible de changements fréquents.

Dans le domaine des gammes d'assemblage, on continuera à appliquer à une vaste échelle les procédés continus et la mécanisation poussée des travaux. Ainsi, la productivité lors du montage des assemblages à vis, nécessitant une quantité de travail très importante, peut être accrue par l'utilisation d'un outillage électrique et pneumatique pour le serrage normalisé des écrous et des vis, et surtout par celle d'outillages multibroches à couple moteur de serrage réglable pour chaque type d'écrous. Sans aucun doute, l'automatisation de l'assemblage se poursuivra toujours plus, et surtout dans le domaine du montage des ensembles, car pour automatiser l'assemblage de tout le produit, il faut disposer d'un équipement spécial et compliqué qui doit être remplacé lorsque la construction du produit est modifiée.

L'automatisation des travaux d'assemblage conditionnera un rôle accru de l'interchangeabilité des pièces et des ensembles, et imposera une application de tolérances plus rigoureuses sur les cotes, les formes géométriques et les défauts de positions relatives des pièces et des ensembles montés. De plus, la création des lignes d'assemblage automatiques exige l'établissement d'un outillage d'assemblage mécanisé, de mécanismes de mise en place, des transporteurs mécaniques comportant des dispositifs de commande à programme et autre appareillage spécial.

L'attention doit être attirée notamment par une machine d'assemblage automatique dont l'élément principal est le bâti muni d'un mécanisme commandant la chaîne fermée horizontale ou verticale à laquelle sont fixés les montages de mise en place. Le bâti porte le long de la chaîne des mécanismes automatiques assurant le rivetage, la pose à force, le brasage, le serrage des écrous et des vis, ainsi que l'usinage nécessité par l'assemblage. Les machines automatiques peuvent former des lignes et être munis alors d'appareillage de manutention.

En construction mécanique, l'automatisation est la forme suprêem de la fabrication, mais elle est également susceptible de perfectionnement.

En guise de conclusion il faut souligner l'action importante qu'exerce la conception d'une machine et de ses éléments sur la gamme de fabrication, la productivité, ainsi que sur la mécanisation et l'automatisation éventuelles des gammes de production. Toute construction n'offre pas les conditions suffisantes pour augmenter la productivité et rendre l'automatisation des gammes de production avantageuse ; ce n'est le fait que des constructions établies en fonction des prescriptions imposées par la fabrication. D'autre part, le développement et le perfectionnement des modes de fabrication créent les prémisses de création des constructions d'une classe plus élevée. Le développement actuel de la technique rend plus rigoureuses les prescriptions concernant les gammes de fabrication, l'agent de méthodes étant ainsi obligé de perfectionner sans cesse et sans trêve ces gammes.

Les nouvelles constructions incitent la recherche de nouveaux modes de fabrication et, inversement, le développement de la technologie en construction mécanique, l'établissement de nouveaux modes de fabrication à productivité et à précision élevées rendent possible la création des constructions nouvelles plus perfectionnées. Ce n'est donc pas un hasard si dans les usines pilotes les ingénieurs d'étude et les agents de méthodes collaborent étroitement pour créer des constructions nouvelles. Une telle collaboration est le gage d'un essor continu de la technique et de la technologie de la construction mécanique.

ANNEXE 1a

Déplacement des barres calibrées lors de leur fixation sur une pince

Diamètre D, mm	de 6 à 10	de 10 à 18	de 18 à 30	de 30 à 50	de 50 à 80	de 80 à 100
Déplacement radial, μ	50	60	70	90	100	120
Déplacement axial, μ	30	40	50	60	70	80

ANNEXE 1b

Déplacement des ronds d'acier laminés à chaud de précision de laminage améliorée lors de leur fixation sur un mandrin à serrage concentrique

Diamètre D, mm	Jusqu'à 0	de 10 à 18	de 19 à 25	de 26 à 48	de 50 à 58	de 60 à 78	de 80 à 95	de 100 à 115	de 120 à 125	de 130 à 150
Déplacement radial, μ	100	120	150	200	270	320	400	500	600	650
Déplacement axial, μ	70	80	100	130	180	210	270	330	400	430

ANNEXE 1c

Déplacement des ronds d'acier laminés à chaud de précision courante lors de leur fixation sur un mandrin à serrage concentrique

Diamètre D, mm	Jusqu'à 19	de 20 à 25	de 26 à 48	de 50 à 56	de 58 à 78	de 80 à 95	de 100 à 115	de 120 à 150	Plus de 150
Déplacement radial, μ	200	220	280	350	400	450	570	700	900
Déplacement axial, μ	130	150	190	230	270	300	380	470	600

ANNEXE 1d

Valeurs moyennes du déplacement des ébauches lors de leur fixation sur un mandrin à serrage concentrique

Caractéristique de la surface sollicitée par l'effort de serrage	Diamètre de la surface serrée D, mm							
	jusqu'à 50	de 50 à 120	de 120 à 260	de 260 à 500	jusqu'à 50	de 50 à 120	de 120 à 260	de 260 à 500
	Déplacement radial de l'ébauche, μ				Déplacement axial de l'ébauche, μ			
Obtenue par moulage en sable à la machine	300	400	500	600	100	120	150	200
Obtenue par moulage en moule permanent	200	300	400	500	80	100	120	150
Obtenue par moulage à cire perdue et en carapace	100	150	200	250	50	80	100	120
Obtenue par estampage à chaud sur des marteaux	300	400	500	600	100	120	150	200
Obtenue par estampage à chaud sur des presses mécaniques	200	300	400	500	80	100	120	150
Façonnée au préalable	100	150	200	250	50	80	100	120
Finie	50	80	100	120	30	50	80	100
Rectifiée	20	30	40	50	10	15	25	30

Lors de l'usinage des ébauches à partir d'une seule sous-phase, c'est-à-dire avec le même serrage de l'ébauche, les valeurs des défauts de mise en place ε'_m calculées doivent être attribuées à la première reprise de chaque surface usinée.

Le défaut de mise en place de la deuxième reprise ε''_m est obtenu suivant la formule :

$$\varepsilon''_m = K\varepsilon'_m + \varepsilon_{ind},$$

où K est le coefficient de précision ;

ε'_m, le défaut de mise en place de la première reprise ;

ε_{ind}, le défaut d'indexage du dispositif d'indexage (table à indexages, tambour de la broche, tête à revolver, etc.) ; la valeur moyenne de $\varepsilon_{ind} = 50\mu$.

Pour les reprises suivantes on peut négliger le défaut de mise en place, sa valeur étant trop faible, et ne tenir compte que du défaut d'indexage.

Pour le façonnage avec un outil flottant on ne tient pas compte du défaut d'indexage.

ANNEXE 1e

Déplacement des ébauches lors du serrage sur des montages

a) Lorsque la force de serrage est perpendiculaire à la surface d'appui principale.

Caractéristique de la surface	Affaissement de l'ébauche $\varepsilon_{éb}$, μ
Obtenue par moulage en sable à la machine et par estampage à chaud sur des marteaux (surface brute)	100-150
Obtenue par moulage dans un moule permanent et par estampage à chaud sur des presses mécaniques (surface brute)	75-100
Obtenue par moulage en carapace et à cire perdue	40-50
Après le dégrossissage	50-75
Après la finition	10-15

b) Lorsque l'ébauche est fixée sur un montage du type étau, la force de serrage étant parallèle à la surface d'appui provoque le pivotement de l'ébauche. Par suite d'un défaut de serrage important, ce type de mise en place s'emploie pour les ébauches de faible largeur.

c) Lors de la mise en place sur un plateau magnétique, le défaut de serrage n'est pas pris en considération.

ANNEXE 2

Défaut de mise en place d'une ébauche avec dégauchissage
(données fournies par la construction mécanique lourde)

Mode de mise en place	Cotes des ébauches, m		
	jusqu'à 3	de 3 à 6	plus de 6
	Défaut de mise en place, mm		
Dégauchissage suivant le traçage . .	±0,5	±1,0	±1,5
Dégauchissage suivant une surface usinée	±0,1	±0,2	±0,3
Dégauchissage suivant une surface brute	±1,5	±2,0	±3,0

ANNEXE 3a

Valeurs de $\left(\frac{l-x}{l}\right)^2$, $\left(\frac{x}{l}\right)^2$, $\frac{(l-x)^2x^2}{l}$ en fonction de la distance x de l'outil à la face de l'ébauche se trouvant près de la poupée lors de l'usinage entre pointes sur un tour

x	0	$0,1l$	$0,2l$	$0,3l$	$0,4l$	$0,5l$
$\left(\frac{l-x}{l}\right)^2$	1	0,81	0,64	0,49	0,36	0,25
$\left(\frac{x}{l}\right)^2$	0	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25
$\frac{(l-x)^2x^2}{l}$	0	$0,0081l^3$	$0,0256l^3$	$0,0441l^3$	$0,0576l^3$	$0,0625l^3$
x	$0,5l$	$0,6l$	$0,7l$	$0,8l$	$0,9l$	$1,0l$
$\left(\frac{l-x}{l}\right)^2$	0,25	0,16	0,09	0,04	0,01	0
$\left(\frac{x}{l}\right)^2$	0,25	0,36	0,49	0,64	0,81	1
$\frac{(l-x)^2x^2}{l}$	$0,0625l^3$	$0,0576l^3$	$0,0441l^3$	$0,0256l^3$	$0,0081l^3$	0

ANNEXE 3b

Valeurs approchées de la flexibilité des éléments des machines-outils

La flexibilité des éléments de machines-outils de mêmes dimensions, qu'il s'agisse de machines nouvelles ou se trouvant en exploitation, varie dans de larges limites; on ne peut donc qu'indiquer les valeurs de flexibilité approchées.

La flexibilité des éléments de tours

Hauteur des pointes en mm	200	300	400
Flexibilité en μ/kg :			
poupée	0,20	0,13	0,10
chariot	0,25	0,17	0,12
contre-poupée	0,30	0,20	0,16
pointes	0,20	0,15	0,10
mandrins vissés sur le bout fileté de la broche, le bras étant chargé à 200 mm	1,4-0,7	1,2-0,6	0,4-0,3
mandrins fixés par flasque, le bras étant chargé à 300 mm	—	—	0,3-0,2

Lorsque la longueur du bras chargé change, la flexibilité du mandrin change elle aussi et c'est pourquoi elle doit être établie en fonction de la longueur des bras auxquels la force de coupe est appliquée.

Pour calculer la flexibilité des poupées il faut tenir compte de la flexibilité des pointes lors de l'usinage entre pointes et de la flexibilité du mandrin lors du montage en l'air; sa valeur s'établit donc en additionnant la flexibilité de la poupée et celle de la pointe ou du mandrin.

La flexibilité totale moyenne des tours multibroches semi-automatiques verticaux s'écrit: $W_m = 0,5$ à $0,7$ μ/kg.

Les valeurs totales moyennes de la flexibilité des tours automatiques à barre: a) monobroches $W_m = 0,2$ à $0,3$ μ/kg; b) multibroches $W_m = 0,3$ à $0,4$ μ/kg.

La valeur totale moyenne de la flexibilité des rectifieuses sans centre $W_m = 1$ μ/kg.

La flexibilité des éléments de fraiseuses verticales, modèle 612, en μ/kg

Corps de l'ensemble de la broche	0,18
Ensemble de la broche	0,20
Ensemble console — chariot — table	0,01
Flexibilité totale des ensembles de la machine	0,40

ANNEXE 3c

Valeurs approchées de la rigidité (J) et de la flexibilité (W) des machines-outils

Valeurs totales moyennes de la rigidité et de la flexibilité des machines-outils;

1) fraiseuse genre raboteuse à table de 4,25 × 1,5 m: $j = 2\,500$ kg/mm, $W = 0,4$μ/kg;

2) tour à plateau d'un diamètre $d = 3$ m: $j = 2\,800$ kg/mm, $W = 0,36$μ/kg;

3) valeurs moyennes de la rigidité et de la flexibilité des ensembles de l'aléseuse, modèle 2630 (diamètre de la broche 125 mm): a) table près du montant de la broche: $j = 18\,000$ kg/mm, $W = 0,06$μ/kg; b) table située à la plus grande distance du montant de la broche: $j = 12\,500$ kg/mm, $W = 0,08$μ/kg; c) poupée de la broche: $j = 18\,000$ kg/mm, $W = 0,06$μ/kg: d) contre-poupée: $j = 1000$ kg/mm, $W = 1,0$μ/kg.

La flèche des barres d'alésage et des mandrins est définie par calcul en fonction de la composante de la force de coupe F_y; sa valeur est ajoutée aux refoulements totaux des ensembles de la machine.

ANNEXE 4

Maxima et minima des refoulements totaux du système élastique machine-pièce (Y_{syst} en μ) en fonction de la flexibilité de la poupée et de la contre-poupée d'un tour et de la flèche de l'ébauche

	x	0	0,1l	0,2l	0,3l	0,4l	0,5l	0,6l	0,7l	0,8l	0,9l	1,0l
1)	Y_{syst}	27,3	25,7	25,1 min	25,4	25,7	26,1	26,4	26,8	27,3	28,6	30,8 max
2)	Y_{syst}	30,8 max	28,6	27,3	26,8	26,4	26,1	25,7	25,4	25,1 min	25,7	27,3
3)	Y_{syst}	27,3	26,4 min	26,8	28,9	30,4	31,2 max	31,1	30,4	29,0	29,2	30,8
4)	Y_{syst}	27,3	26,4 min	26,8	28,6	29,9	30,4 max	29,9	28,6	26,8	26,4 min	27,3
5)	Y_{syst}	27,3 max	25,7	25,1 min	25,1	25,2	25,3	25,2	25,1	25,1 min	25,7	27,3 max
6)	Y_{syst}	27,3 max	26,0	25,9 min	26,4	27,0	27,3 max	27,0	26,4	25,9 min	26,0	27,3 max

Le calcul des refoulements s'effectue suivant la formule (29) réduite à la notation suivante :

$$Y_{syst} = F_y \left[W_{ch} + W_p \left(\frac{l-x}{x}\right)^2 + W_c \left(\frac{x}{l}\right)^2 + 0{,}0062 \cdot \frac{1}{d^3} \frac{(l-x)^2 x^2}{l} \right],$$

où

$$0{,}0062 \cdot \frac{1}{d^3} = \frac{1000}{3EJ} = \frac{1000 \cdot 64}{3E\pi d^4} = \frac{1000 \cdot 64}{3E\pi d \cdot d^3}$$

en admettant que $E = 2{,}2 \cdot 10^4$ kg/mm² et $J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$.

Pour tous les calculs on pose : $F_y = 44$ kg ; $W_{ch} = 0{,}36$ μ/kg ; $d = 50$ mm. Pour le calcul de six cas de Y_{syst}, on a posé :

1) $W_p = 0{,}26$ μ/kg ; $W_c = 0{,}34$ μ/kg ; $x_m = 0{,}433l < 0{,}5\,l$; $l = 300$ mm ; $l : d = 6$.
2) $W_p = 0{,}34$ μ/kg ; $W_c = 0{,}26$ μ/kg ; $x_m = 0{,}566l > 0{,}5\,l$; $l = 300$ mm ; $l : d = 6$.
3) $W_p = 0{,}26$ μ/kg ; $W_c = 0{,}34$ μ/kg ; $x_m = 0{,}433l < 0{,}5\,l$; $l = 400$ mm ; $l : d = 8$.
4) $W_p = W_c = 0{,}26$ μ/kg ; $x_m = 0{,}5l$; $l = 400$ mm ; $l : d = 8$.
5) $W_p = W_c = 0{,}26$ μ/kg ; $x_m = 0{,}5l$; $l = 300$ mm ; $l : d = 6$.
6) $W_p = W_c = 0{,}26$ μ/kg ; $x_m = 0{,}5l$; $l = 345$ mm ; $l : d = 6{,}9$.

ANNEXE 5a

Classes de précision et d'état de surface en usinage par des outils tranchants

Modes d'usinage	Classes de précision	Classes d'état de surface
Ebauchage par outils	4-7	4-1
Ebauchage par fraises cylindrique et en bout	4-5	5-3
Finition par outils et à la fraise [1]	3a-4	6-4
Usinage fin par outils et fraises en bout	2-3	8-7
Brochage intérieur et extérieur	2a-3a	7-6
Perçage	4-5	5-4
Alésage	2-3a	8-6

[1] La finition rapide par outils et fraises améliore l'état de surface d'une classe.

ANNEXE 5b

Classes de précision et d'état de surface en usinage par des meules

Modes d'usinage	Classes de précision	Classes d'état de surface
Rectification[1] :		
simple	3-2a	7-6
ébauche	3	7-5
finition	2a-2	8-7
fine	2-1	10-8
Pierrage	2-1	10-8
Rodage mécanique	1re et supér.	12-8
Superfinition	Ces modes d'usinage n'améliorent pas la classe de précision	13-9
Polissage par bande abrasive et meules douces enduites de pâtes	Ces modes d'usinage n'améliorent pas la classe de précision	12-8

[1] La rectification rapide améliore l'état de surface d'une classe.

ANNEXE 5c

Classes de précision et d'état des surfaces élémentaires des pièces mécaniques

Surfaces élémentaires	Classes de précision	Classes d'état de surface
Portées des arbres	5-1	4-9
Trous de tenue	5-1	4-8
Surfaces actives des cylindres	2-1	8-9
Trous coniques rodés	2-1	8-9
Axes d'indexage et trous prévus pour les recevoir	2a-2	8-10
Trous coniques pour chevilles	3-2	6-8
Rainures de clavette et clavettes	4-2	5-7
Surfaces de guidage	—	7-8
Surfaces conjuguées des corps	—	5-7
Surfaces non conjuguées:		
a) en saillie	—	5-7
b) ne faisant pas saillie	—	3-5
Pièces planes en construction mécanique lourde: défauts de planéité 0,04 à 0,30 mm	—	5-7

Note. En étudiant la relation entre la précision d'usinage et l'état de surface, le professeur Iacobson a établi le rapport approximatif suivant : $H_{moy} = C\delta$ (où δ est la tolérance prévue sur la cote de la pièce considérée) et les valeurs numériques du coefficient C dans les limites comprises entre 0,05 et 0,12 pour les différents groupes conventionnels de tolérances sur les cotes de 6 à 250 mm.

ANNEXE 6

Valeurs du coefficient du temps principal en usinage sur des machines-outils

(tableau dressé sur la base de données expérimentales obtenues pour les régimes de coupe usuels)

Mode d'usinage	Coefficient
Tronçonnage par des fraises à disque et des outils	0,45-0,50
Centrage sur des machines à centrer	0,40-0,45
Fraisage des faces et centrage sur des fraiseuses à centrer	0,50-0,55
Perçage sur des perceuses	0,50-0,65
Fraisage des trous et alésage sur des perceuses	0,45-0,55
Façonnage sur des tours	0,55-0,65
Façonnage sur des fraiseuses	0,55-0,75
Fraisage continu sur des fraiseuses à plateau carrousel et à tambour	0,85-0,90
Usinage sur des machines à rectifier des surfaces extérieures et intérieures	0,6-0,8
Usinage sur des rectifieuses planes	0,6-0,7
Façonnage sur des machines à brocher	0,35-0,45
Taillage des dentures	0,75-0,85
Exécution des filets	0,70-0,75

Table des matières